

Trabajo Fin de Máster

DISEÑO DE PASARELA PEATONAL SOBRE EL RÍO ÓRBIGO EN SANTA MARINA DEL REY (LEÓN) (Tomo 1/2)

Autor

Yolanda Más Val

Director

Luis Gracia Villa

Universidad de Zaragoza / Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2011

DISEÑO DE PASARELA PEATONAL SOBRE EL RÍO ÓRBIGO EN SANTA MARINA DEL REY (LEÓN)

RESUMEN

El objetivo del proyecto es el diseño completo de una pasarela peatonal, adyacente al puente sobre el río Órbigo situada en la localidad de Santa Marina del Rey, en la provincia de León.

El puente actual es una antigua estructura de hormigón, de unos 170 metros de longitud, que presenta una serie de obsolescencias funcionales con respecto al tráfico de peatones debido a la anchura de las aceras, lo que hace imposible su uso para personas con movilidad reducida. Si se opta por ensancharlas, se reduce en exceso el ancho de la calzada, con lo que es necesaria la ejecución de una nueva pasarela peatonal adyacente como solución al problema.

La futura pasarela de 1.8 metros de anchura, está modulada en diferentes vanos independientes, constituidos por una estructura base de viga cajón metálica tipo artesa de sección variable de acero S 275 J2 G3.

La viga cajón metálica se completa, con un forjado de hormigón, tipo chapa colaborante, constituyendo finalmente una viga mixta acero-hormigón.

Sobre el puente de hormigón será necesario demoler y refrentar una zona de los machones en pilares para insertar mediante anclajes los voladizos de los apoyos en las mensulas de los diferentes tramos de la pasarela.

A partir del diseño elegido, se describe la geometría y características generales de la pasarela, indicando las modificaciones necesarias que se introducirán en el desarrollo del proyecto.

Para verificar las condiciones de funcionamiento de la pasarela, se realizarán cuatro tipos de análisis diferentes: estático, de estabilidad, de vibraciones y de dilatación.

A efectos de optimizar el diseño, se realiza un análisis de sensibilidad relativo a las variables de diseño seleccionadas, que constituyen las únicas variantes modificables, ya que la geometría de la pasarela viene impuesta con condicionantes estéticos.

Una vez decidido el diseño final, se presenta el modelo de elementos finitos utilizado en el cálculo, detallando las condiciones de apoyo y las cargas que actúan sobre la estructura.

Los resultados obtenidos nos permitirán validar el diseño final, a partir del cual se desarrollaran los planos de conjunto y de despiece para la ejecución de la pasarela peatonal.

INDICE GENERAL

ÍNDICE DE LA MEMORIA

<u>1. INTRODUCCIÓN</u>	2
1.1 Introducción	2
1.2 Características de la pasarela	6
<u>2. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD</u>	18
2.1 Introducción	18
2.2 Análisis de sensibilidad	22
2.2.1 Análisis estático	22
2.2.2 Análisis de estabilidad	36
2.2.3 Análisis de vibraciones	38
<u>3. DISEÑO FINAL. MODELO DE CÁLCULO</u>	42
3.1 Modelo geométrico, discretización y materiales	42
3.2 Condiciones de apoyo y cargas	59
<u>4. RESULTADOS Y COMPROBACIONES</u>	65
4.1 Cálculo estático	65
4.2 Cálculo de la dilatación	79
4.3 Análisis de estabilidad	81
4.4 Análisis de vibraciones	92
4.5 Reacciones sobre los apoyos	104
<u>ÍNDICE DE FIGURAS</u>	106
<u>ÍNDICE DE TABLAS</u>	111
<u>BIBLIOGRAFIA</u>	112
<u>LISTA DE PLANOS</u>	113

La carretera LE-443 atraviesa el casco urbano de esta localidad y en su extremo oeste cruza el río Órbigo de este a oeste por un puente de unos 170 metros de longitud (Fig. 3).



Fig. 3. Mapa de carreteras [3].

El puente actual es una antigua estructura de hormigón, que presenta una serie de obsolescencias funcionales con respecto al tráfico de peatones, ya que la anchura de las aceras, de apenas 0.85 metros y apta para un solo peatón, hace muy difícil el uso para personas con movilidad reducida. En su día se estudió la posibilidad de ensanchar el paso de peatones, pero se descartó ya que para ello se tenía que reducir en exceso el ancho de la calzada, produciéndose un peligro adicional para los vehículos, que al cruzarse se aproximarían al bordillo (Fig. 4).

Este puente sobre el río Órbigo se encuentra adyacente al casco urbano y a la zona recreativa, gracias al embalse producido por el azud, circunstancia que atrae a numerosos visitantes y amantes del deporte de la pesca en época estival, ocasionando un elevado tráfico de peatones.

Ante esta situación, es necesaria la ejecución de una nueva pasarela peatonal adyacente a este puente como solución a este peligroso paso de peatones, garantizando la seguridad del usuario, la accesibilidad a personas con discapacidad, bicicletas y peatones en general.

La configuración estética de la pasarela será similar a la del puente existente y los tramos coincidirán con los vanos del puente, los puntos de apoyo con las pilas y su canto simulará la geometría de los arcos.



Fig. 4. Imagen del puente sobre el río Órbigo a su paso por Santa Marina del Rey [4,5].

El objeto de este trabajo, es el diseño completo de la pasarela peatonal compuesta de viga cajón metálica tipo artesa y tablero de forjado colaborante, cuyas características se detallan en los siguientes epígrafes, frente a las cargas normales de funcionamiento.

Se describe, en primer lugar, la geometría y características de la pasarela, detallando los diferentes elementos que la componen.

De acuerdo al diseño propuesto, se realiza, en primer lugar, un análisis de sensibilidad relativo a los espesores de las chapas que constituyen la viga cajón, que son las únicas variables de diseño del problema estructural, dado que la geometría de la pasarela viene impuesta por condicionantes estéticos.

Una vez decidido el diseño final de la pasarela, se presenta, a continuación, el modelo de elementos finitos utilizado en el cálculo, incidiendo en los aspectos más importantes del mismo (tipo y número de elementos, características del material, etc.). Se detallan, igualmente las condiciones de apoyo y las cargas que actuarán sobre cada elemento.

Una vez detallado el modelo, se presentan los resultados obtenidos, de cara a verificar las condiciones de funcionamiento de la pasarela.

Se tienen en cuenta, tanto en el diseño como en el cálculo, las normativas siguientes:

- Código Técnico de la Edificación, Seguridad estructural: Acero (CTE-DB-SE-A)
- Instrucción de Acero Estructural (EAE)
- Instrucción de Hormigón Estructural (EHE)
- Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures: General Rules and Rules for Buildings
- Norma IAP, Instrucción sobre Acciones en Puentes de Carreteras

1.2. Características de la pasarela

La pasarela objeto del presente trabajo está modulada en diferentes vanos independientes (Fig. 5): los tramos inicial y final, denominados tramo A, cuya longitud es de 10.60 metros, y 10 vanos intermedios, denominados tramos B, cuya longitud es de 15 metros.

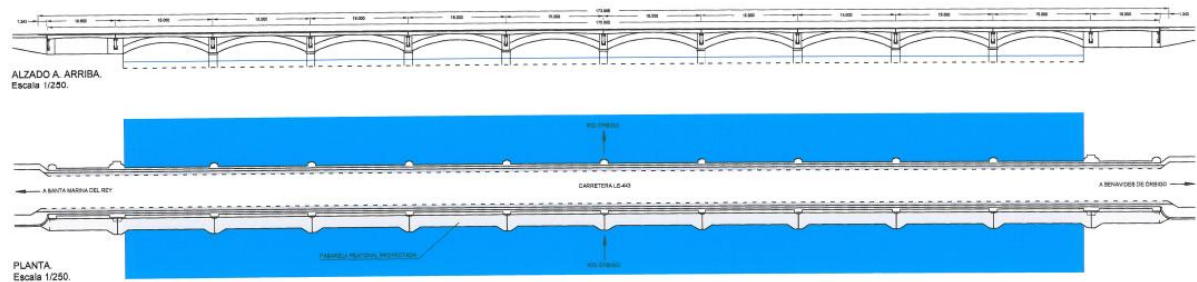


Fig. 5. Planos de referencia. Alzado y planta del puente y pasarela peatonal.

Todos los tramos de la pasarela están constituidos por una estructura base de viga cajón metálica tipo artesa de sección variable (Fig. 6), de acero S 275 J2 G3.

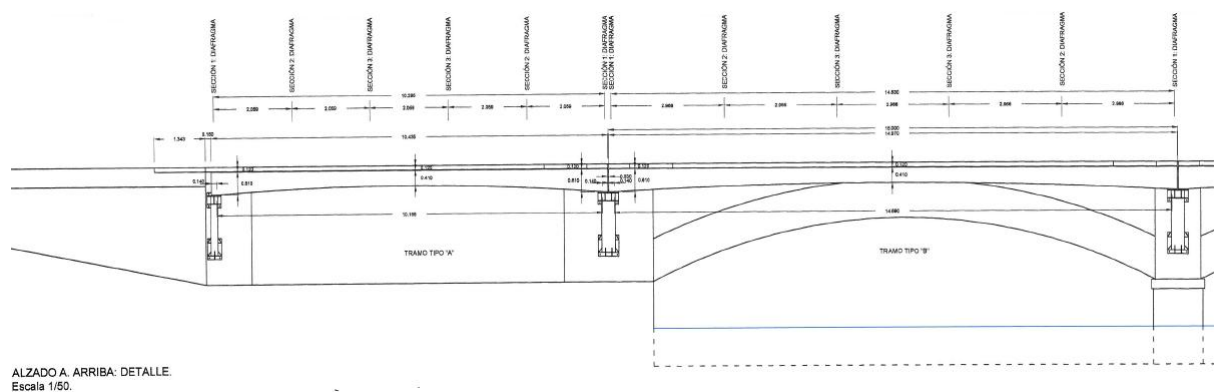


Fig. 6. Planos de referencia. Detalle del alzado.

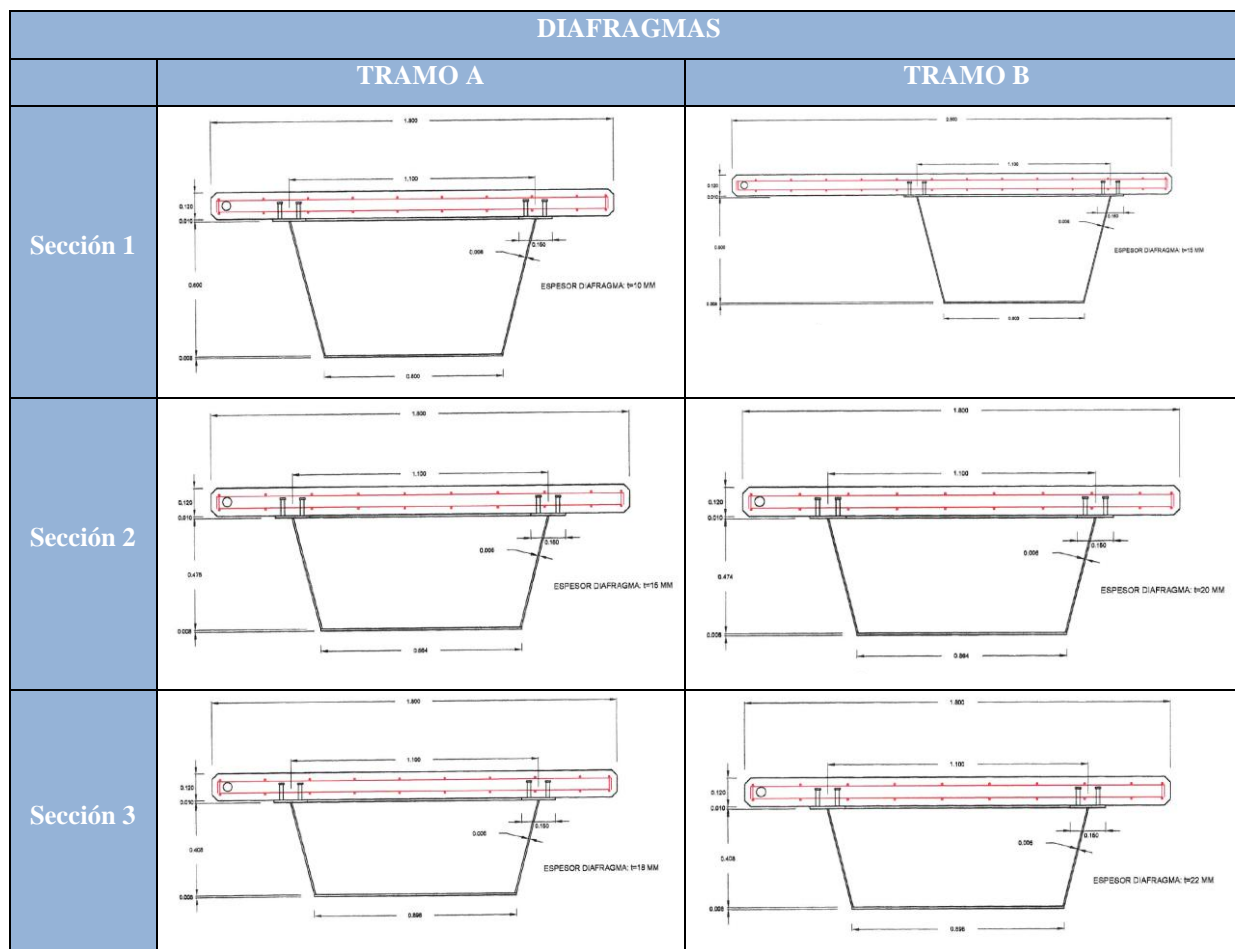


Fig. 7. Detalle secciones planos originales. Tramo A y B.

La viga cajón metálica se completa, en ambos tramos, con un forjado de hormigón, bien tipo losa o tipo colaborante, constituyendo finalmente una viga mixta acero-hormigón (Fig. 7). Si bien la propuesta original incluía una losa maciza, una de las primeras decisiones adoptadas respecto al proyecto ha sido la de sustituirla por un forjado colaborante, de las mismas prestaciones resistentes, pero de menor peso y coste económico (Fig. 8).

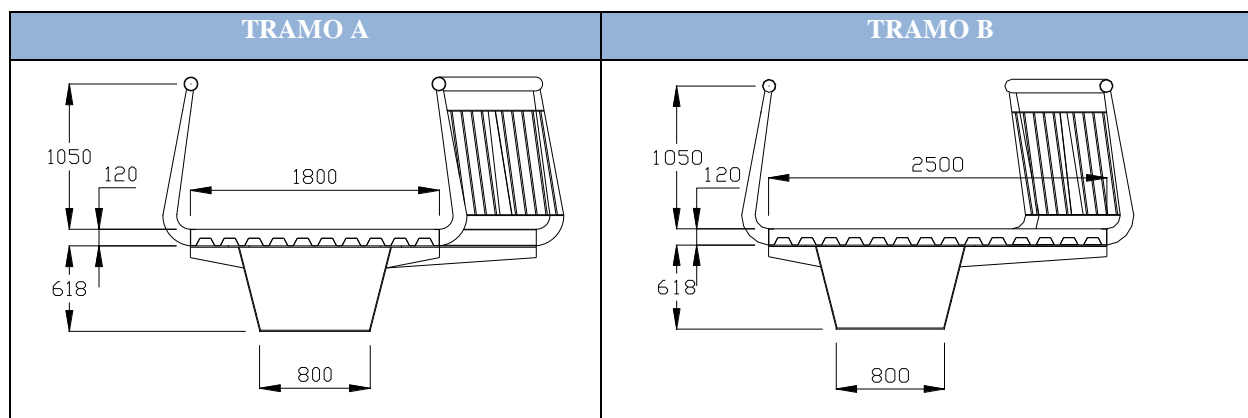


Fig. 8. Detalle secciones. Tramo A y B.

La pasarela tiene una longitud total de 171.20 metros, y una anchura de 1.8 metros constante a lo largo de cada tramo, excepto en la zonas de apoyo con el puente, cuya anchura es de 2.5 metros (Fig. 9).

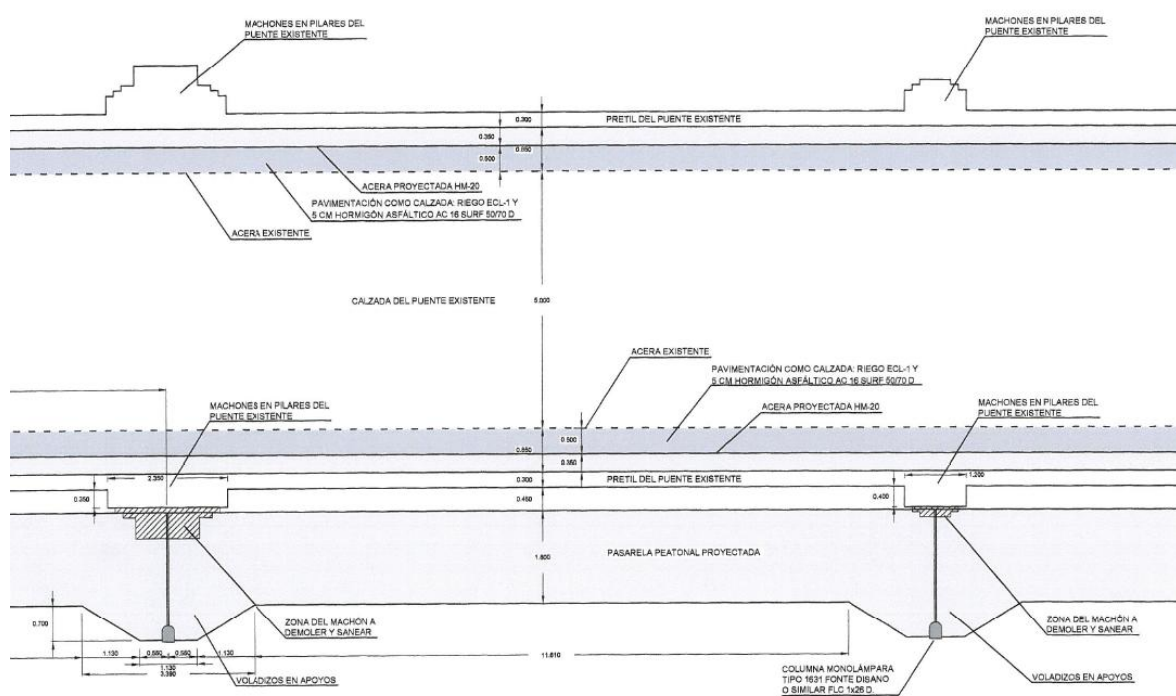


Fig. 9. Planos de referencia. Detalle de la planta.

Las diferentes secciones de los tramos se unen mediante travesaños sobre los que apoya un forjado de chapa colaborante, de 55+65 mm de canto, en hormigón HA-25. Las características de la chapa, de acero S 280 GD y 0.8 mm de espesor, se detallan en la Fig. 10.

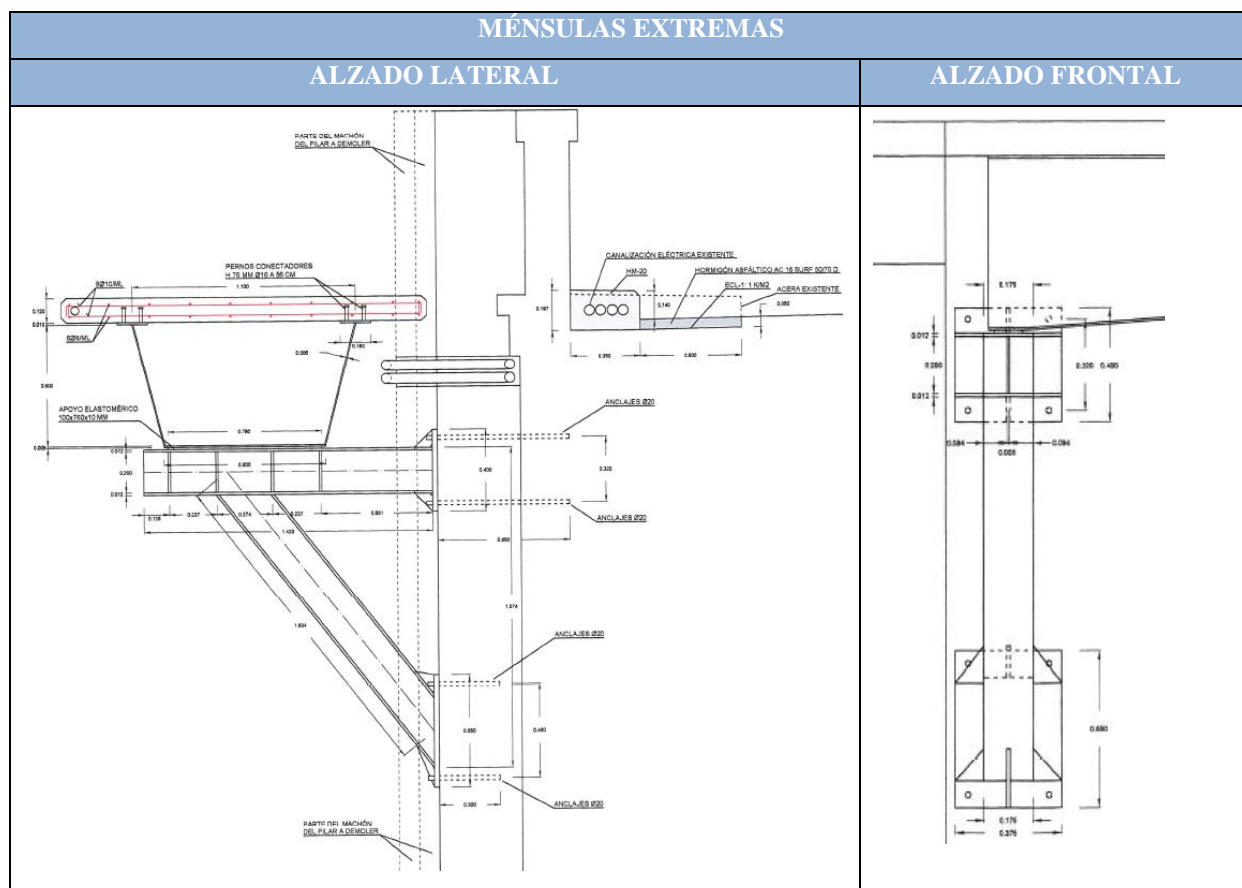


Fig. 12. Planos de referencia. Detalle del apoyo entre pasarela y puente en las ménsulas extremas.

Las dimensiones de la estructura se pueden encontrar con más detalle en los planos de referencia (Anexo).

En las Figs. 13 a 26 se muestran diferentes capturas del modelo sólido realizado para el diseño final obtenido en el presente proyecto. En ellas se pueden ver en detalle todas las características de la pasarela diseñada.

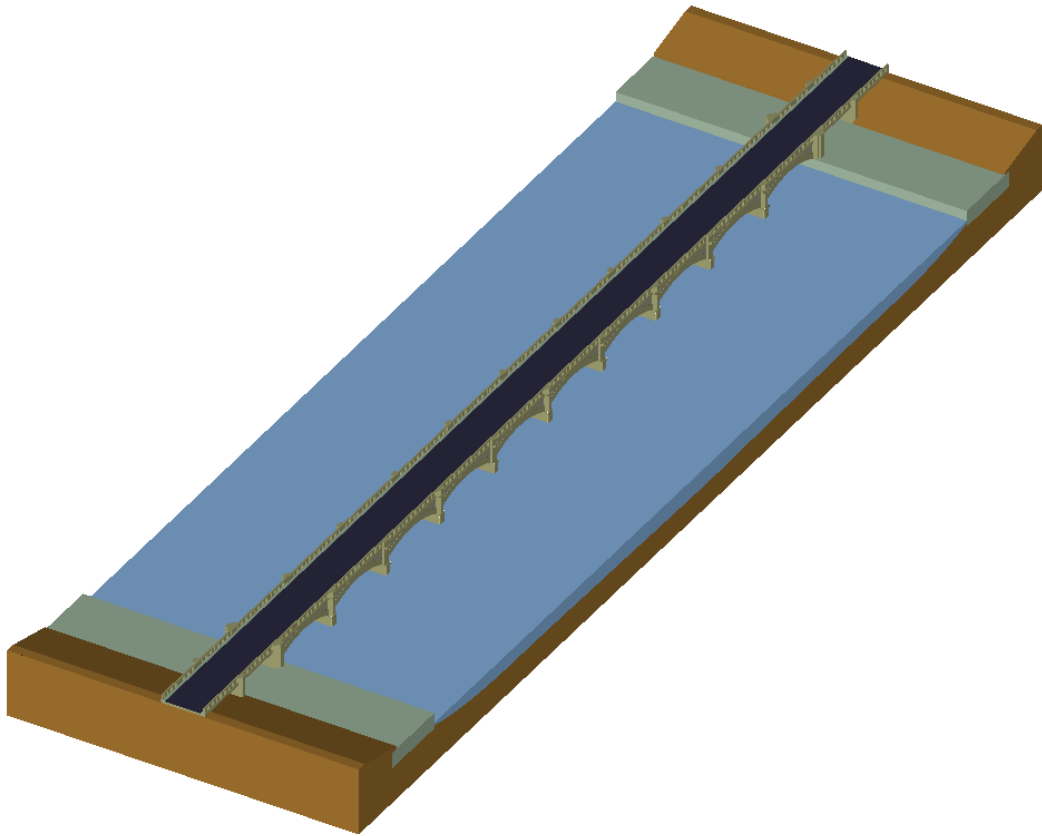


Fig. 13. Puente original, vistas generales

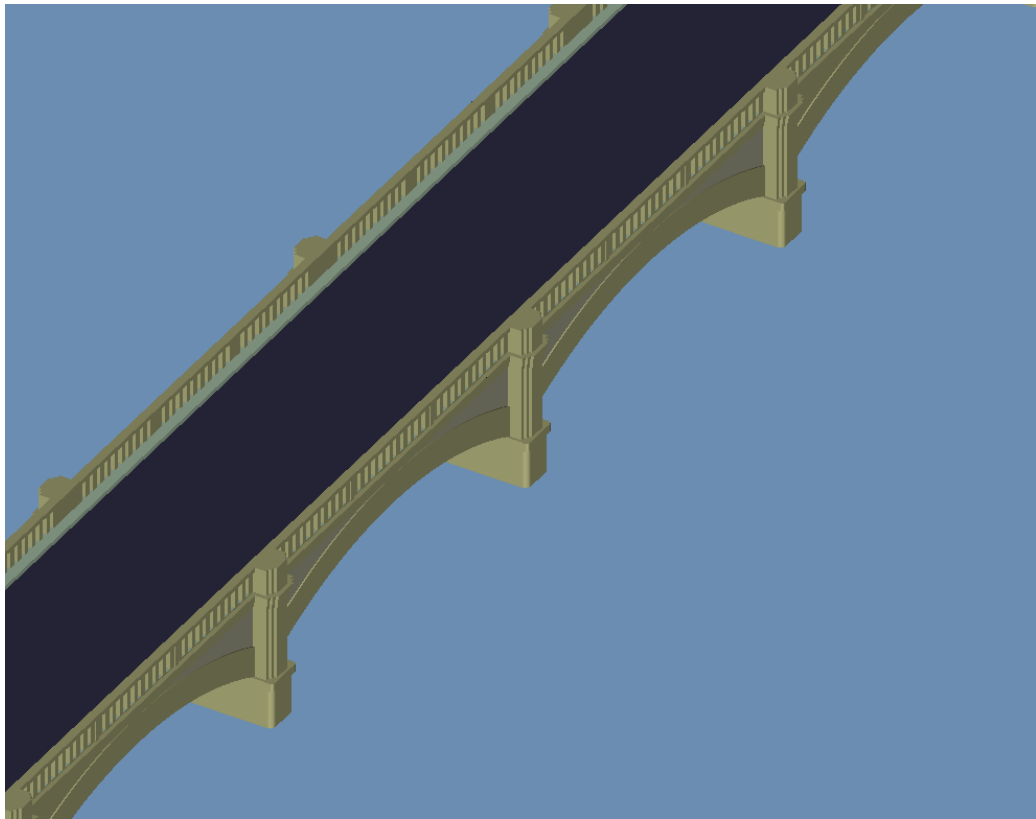


Fig. 14. Detalle del puente

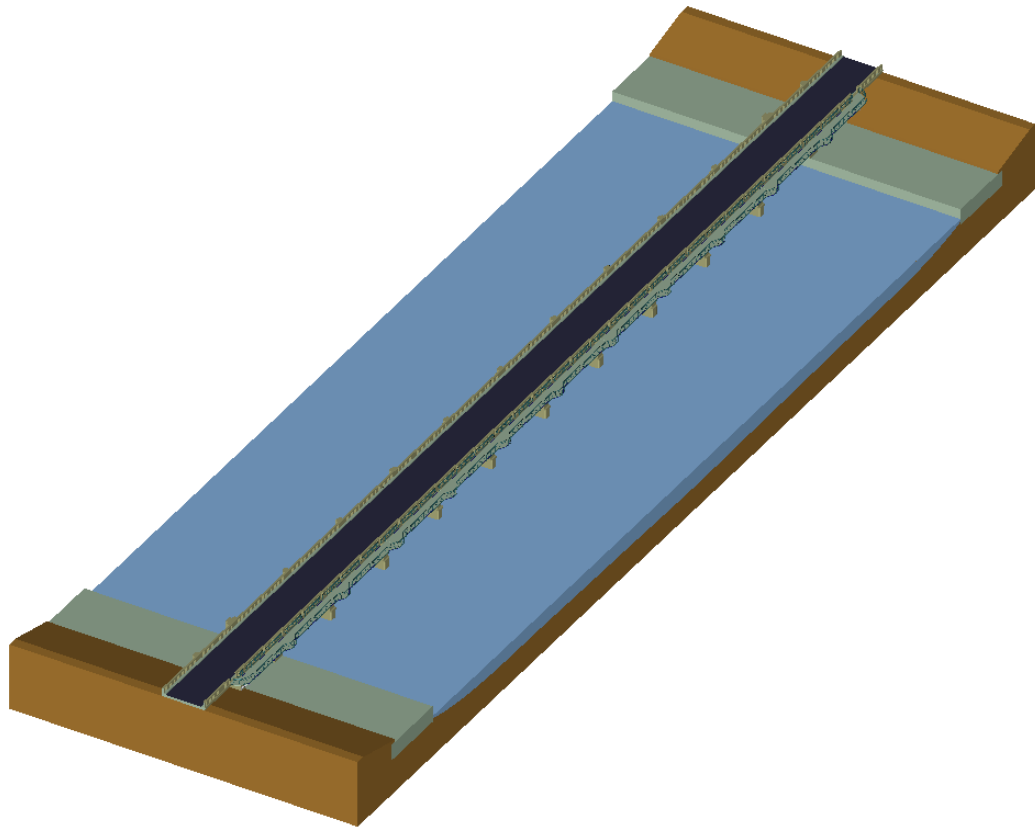


Fig. 15. Configuración del puente con la pasarela peatonal

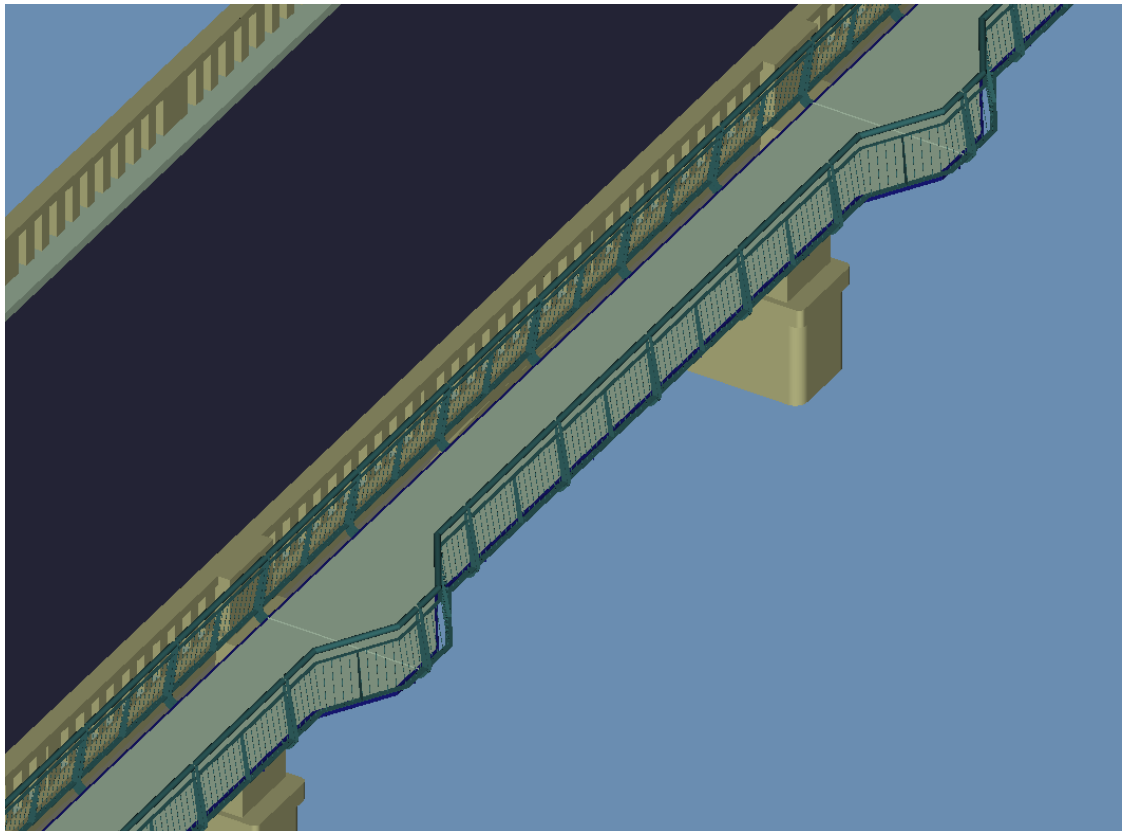


Fig. 16. Detalle del puente con la pasarela peatonal

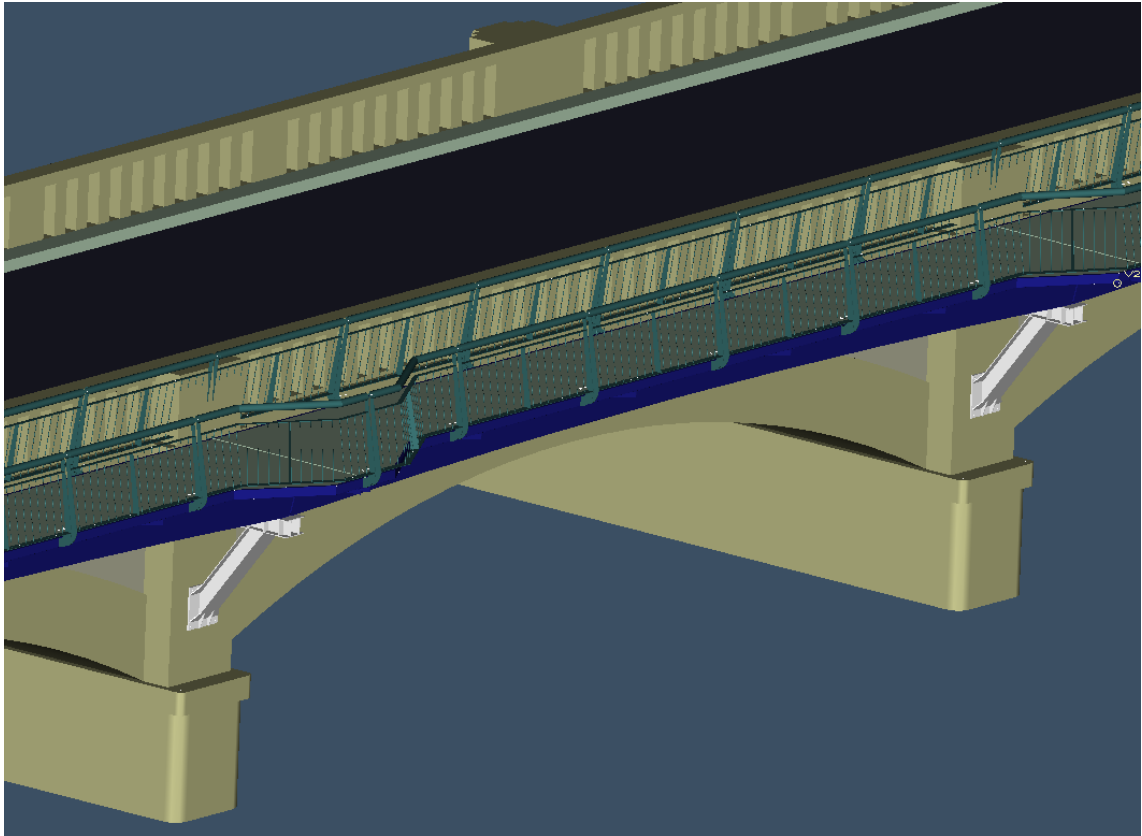


Fig. 17. Detalle pasarela peatonal con apoyos puente hormigón

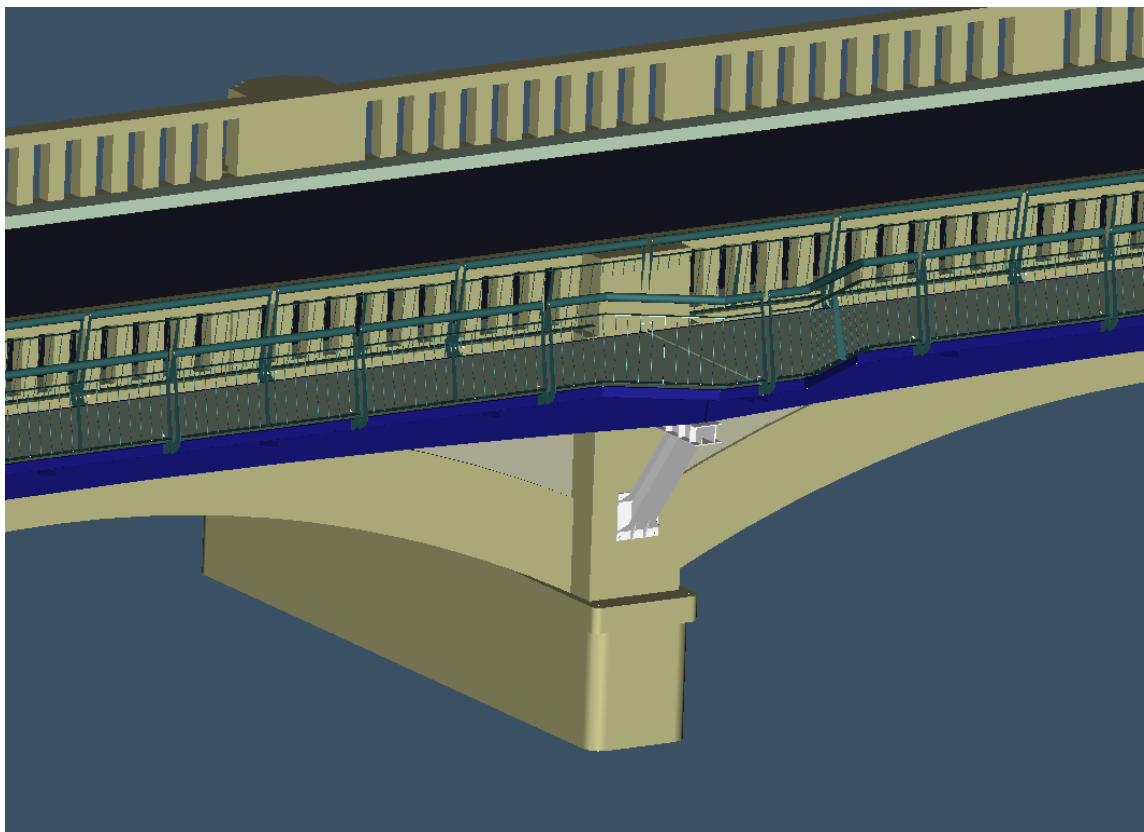


Fig. 18. Detalle ménsula intermedia entre pasarela peatonal y puente hormigón

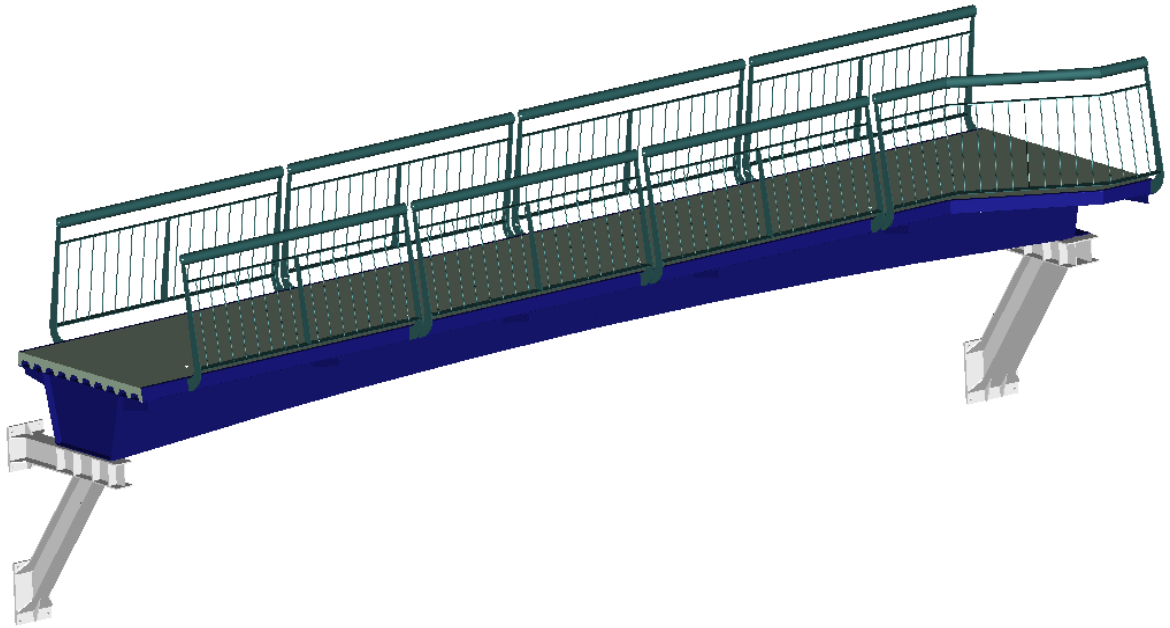


Fig. 19. Detalle Tramo A con apoyos

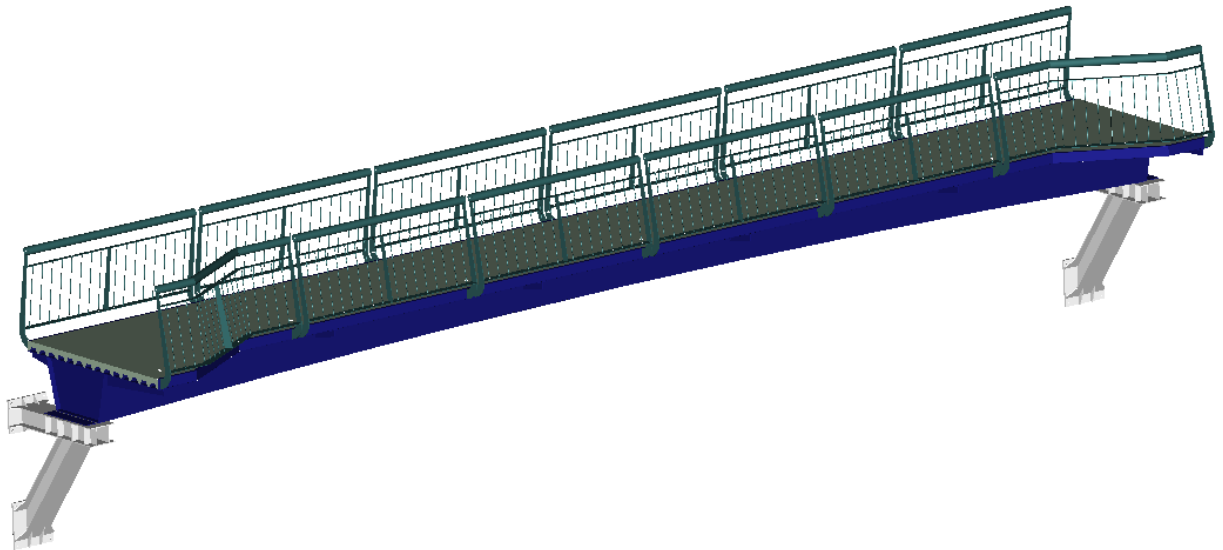


Fig. 20. Detalle Tramo B con apoyos

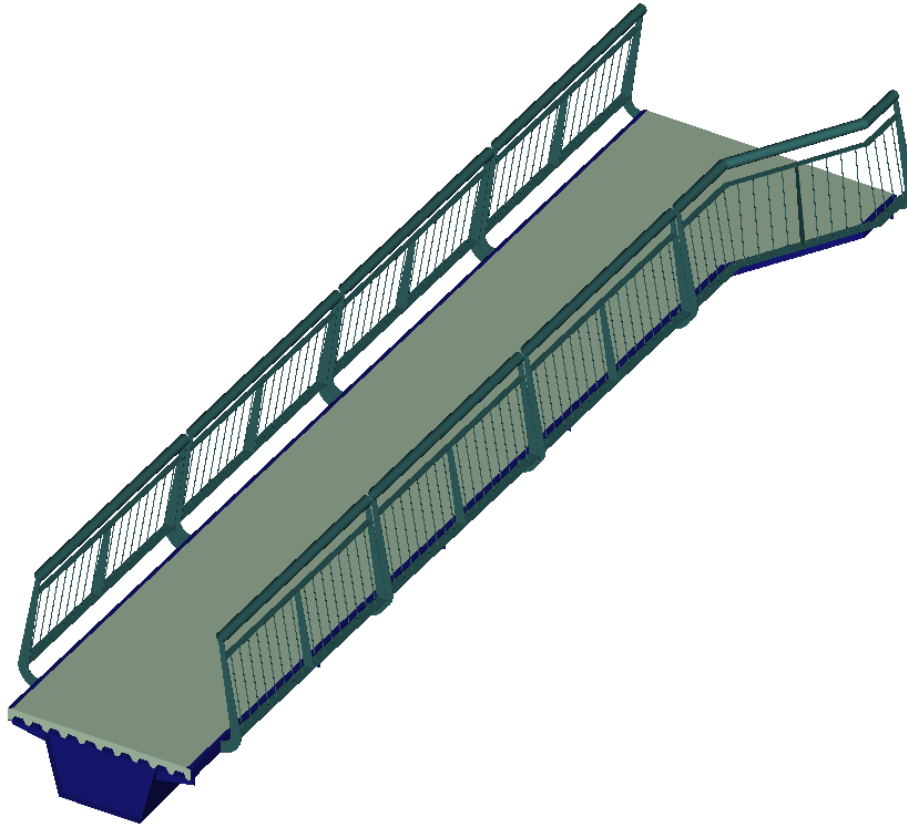


Fig. 21. Configuración del tramo A.

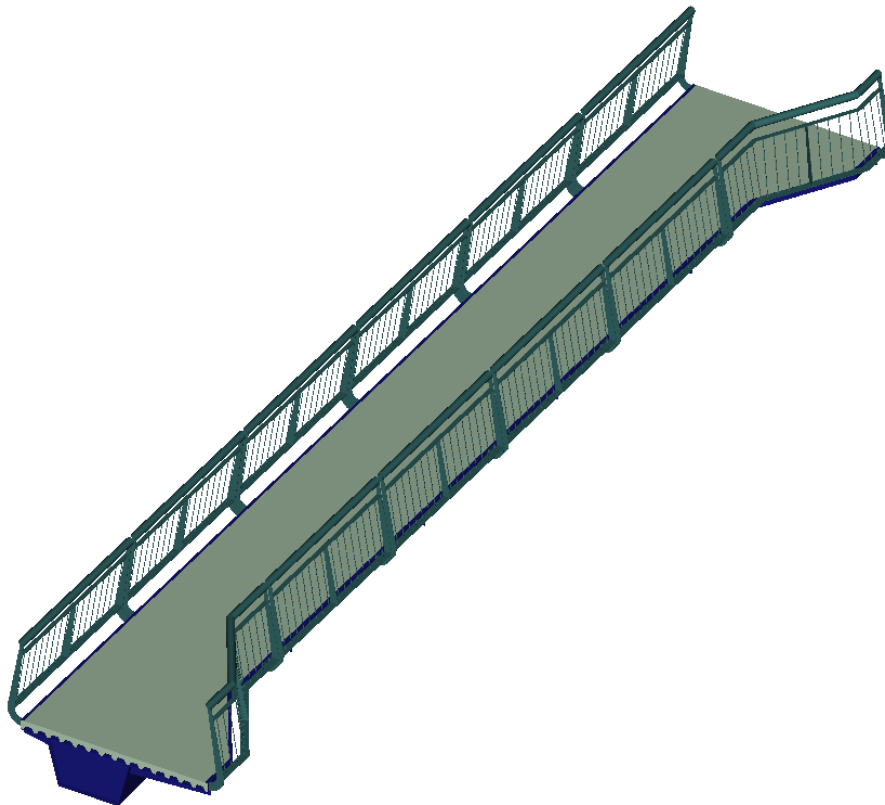


Fig. 22. Configuración del tramo B.

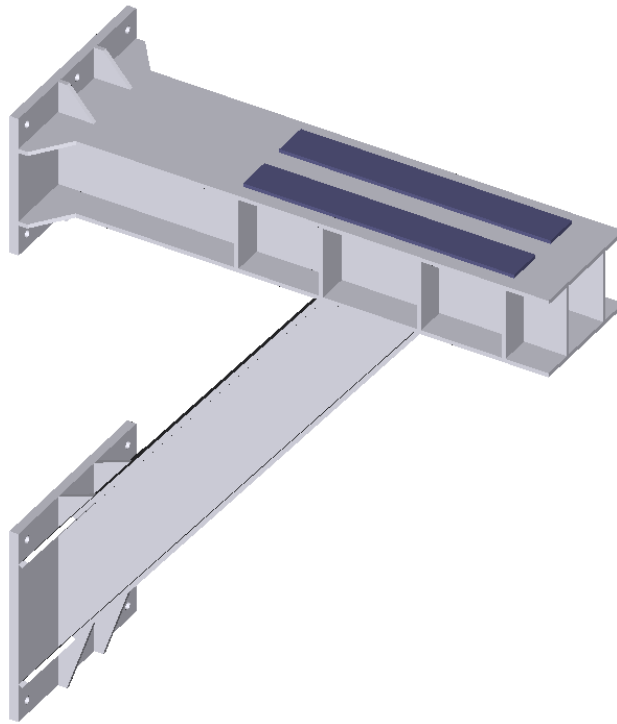


Fig. 23. Detalle del apoyo entre pasarela y puente en las ménsulas intermedias.

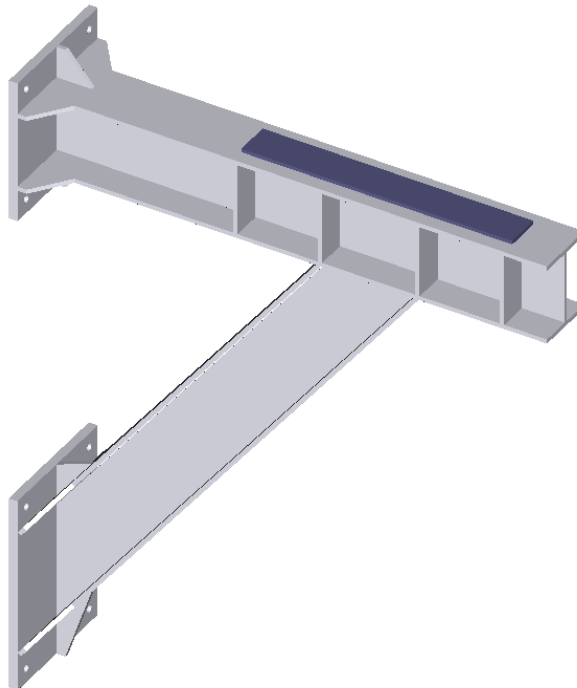


Fig. 24. Detalle del apoyo entre pasarela y puente en las ménsulas extremas.

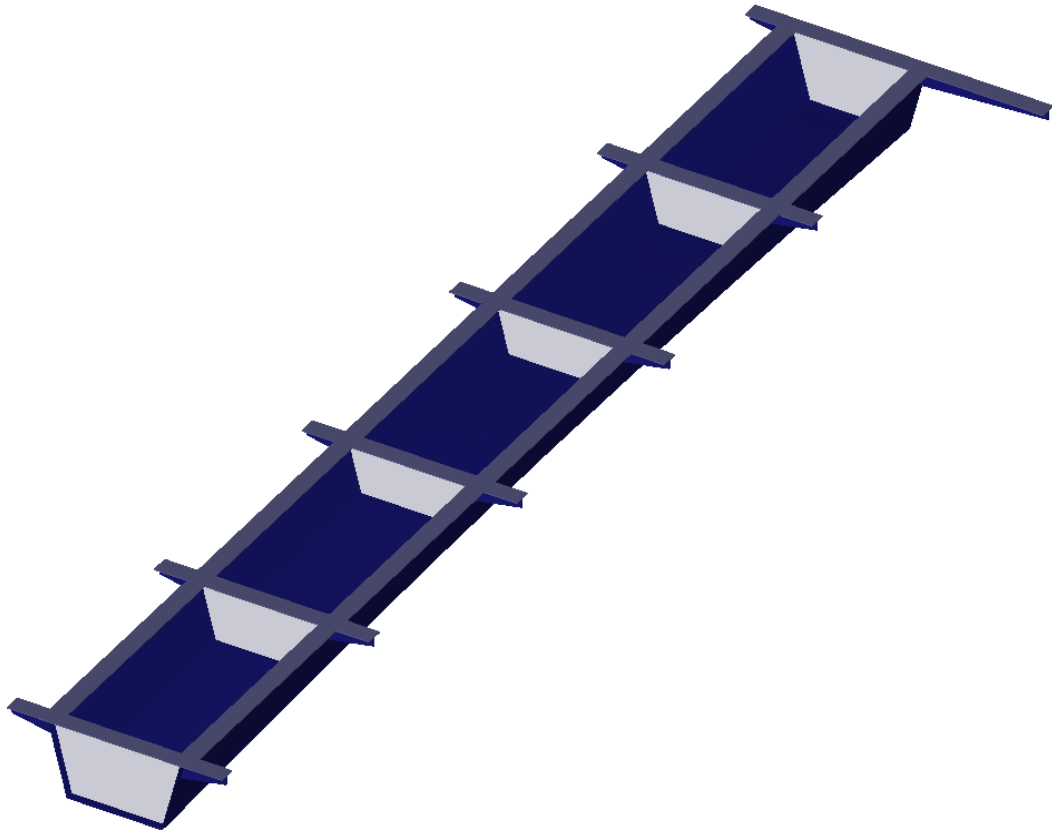


Fig. 25. Detalle viga cajón. Tramo A



Fig. 26. Detalle viga cajón. Tramo B

2. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

2.1. Introducción

Se presenta en este epígrafe el análisis de sensibilidad realizado para los espesores de las chapas de los distintos elementos que configuran la viga cajón.

Se entiende por análisis de sensibilidad la variación de la respuesta estructural frente a cambios en las variables de diseño.

En términos generales, se puede considerar la variación en cualquier función (objetivo, restricciones) frente a cambios en las variables de diseño.

El análisis de sensibilidad en el ámbito del cálculo estructural se realiza mediante tres enfoques diferentes:

- Enfoque discreto
- Enfoque continuo
- Métodos de perturbación

En el caso del presente proyecto, dadas las variables a analizar, que son espesores comerciales, el enfoque más adecuado es el último, por lo que será el utilizado para el análisis propuesto.

En realidad, los métodos de perturbación constituyen un grupo bastante amplio y general de métodos, adecuados para la obtención numérica aproximada de las sensibilidades, que se pueden agrupar en tres tipos, de acuerdo a su planteamiento:

- Métodos directos
- Métodos iterativos
- Métodos aproximados

En este caso, se va a utilizar un método directo, en el que la variación de alguna de las variables de diseño da lugar a un cambio en la rigidez de la estructura, por lo que frente al sistema de ecuaciones de equilibrio original:

$$Ku=F$$

Se obtendrá un nuevo sistema de la forma

$$(K+\Delta K)(u+\Delta u)=F+\Delta F$$

en el que ΔK es el cambio en la rigidez de la estructura debida a la modificación de la variable de diseño analizada, y Δu es la perturbación en la solución del problema estructural. Puesto que el análisis estructural a nivel computacional se realiza mediante un método de rigidez, Δu corresponde a la perturbación en el campo de desplazamientos del problema, pudiendo derivar a partir de ella las perturbaciones correspondientes a deformaciones y tensiones.

El término ΔF representa la modificación en el vector de cargas de la estructura debida a la variación en la variable de diseño analizada. En el caso del presente proyecto, dado que las variables de diseño elegidas no suponen modificación en la geometría de la estructura, la variación del vector de cargas se ve afectada únicamente por el peso propio.

Finalmente, indicar que, con el planteamiento propuesto, será preciso resolver tantos sistemas perturbados como combinaciones posibles de los valores de las variables de diseño se consideren; es decir, será preciso generar tantos modelos diferentes como combinaciones de variable de diseño se contemplen.

En cuanto a las variables de diseño concretas a analizar, se han contemplado como tales los espesores de la base y de los laterales de la viga cajón, respectivamente (Fig. 27).

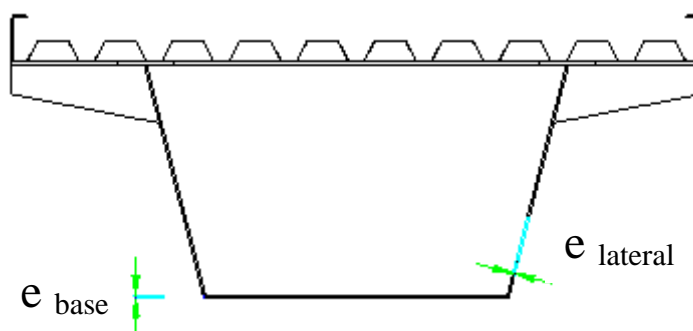


Fig. 27. Variables de diseño

En cuanto a las magnitudes (función objetivo y variables de estado) a analizar, se trata, en primer lugar, como objetivo fundamental del diseño de minimizar el peso total de acero de la viga cajón. Por otra parte, las restricciones estructurales y funcionales vienen impuestas por la normativa en vigor para este tipo de estructuras, ya mencionada en el epígrafe 1.1, y que se concretan en las siguientes:

- Tensión máxima admisible: $275/1.05=261.9$ MPa.
- Flecha máxima admisible con carga permanente (ELS-I): $L/750$
- Flecha máxima admisible con sobrecarga (ELS-II): $L/500$
- Flecha activa máxima (sólo la debida a la sobrecarga): $L/1200$
- Factor de carga crítica de abolladura: No menor que 6
- Primera frecuencia de vibración: No menor de 4.6 Hz

De acuerdo a estas especificaciones, el análisis de sensibilidad se plantea modificando los espesores de las chapas en el modelo de cálculo (que se describirá en detalle en el epígrafe 3), alrededor del valor inicial de predimensionado, de acuerdo a la Tabla I, teniendo en cuenta la gama de espesores comerciales (5, 6, 8, 10 mm).

Tabla I. Espesores de cálculo (mm)

Base	6	8	10
Lateral	5	5	5
	6	6	6
	8	8	8

Este planteamiento requiere el cálculo de 9 modelos para cada tipo de módulo de la pasarela (A y B), y a su vez para cada modelo se realizan tres tipos de análisis diferentes: estático, de estabilidad y de vibraciones.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos, identificando dentro de cada tabla, en color azul, las configuraciones válidas, y en color rojo, aquellas que suponen la violación de alguna de las restricciones anteriormente mencionadas.

2.2. Análisis de sensibilidad

2.2.1. Análisis estático

Tramo A

Desplazamiento máximo vertical con carga permanente [mm].

Tabla II. Desplazamientos máx. vertical y relación (L/δ_v) con carga permanente [mm]. Hipótesis ELS-I. Tramo A

Base\Lateral	5	6	8
6	5,05	4,63	4,13
8	3,95	3,7	3,35
10	3,28	3,13	2,91

Base\Lateral	5	6	8
6	2066	2253	2526
8	2641	2820	3114
10	3181	3333	3585

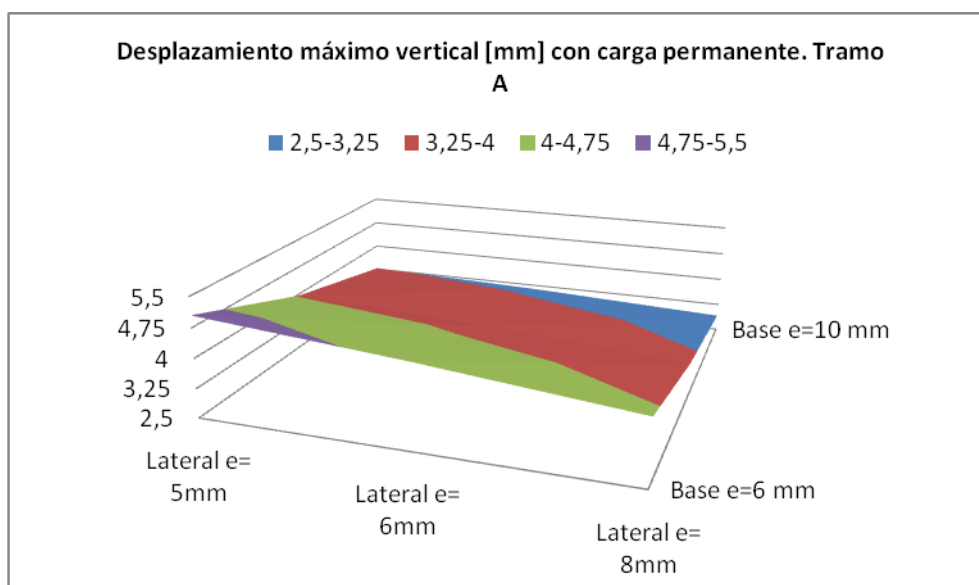


Fig. 28. Desplazamiento máximo vertical [mm] con carga permanente. Tramo A

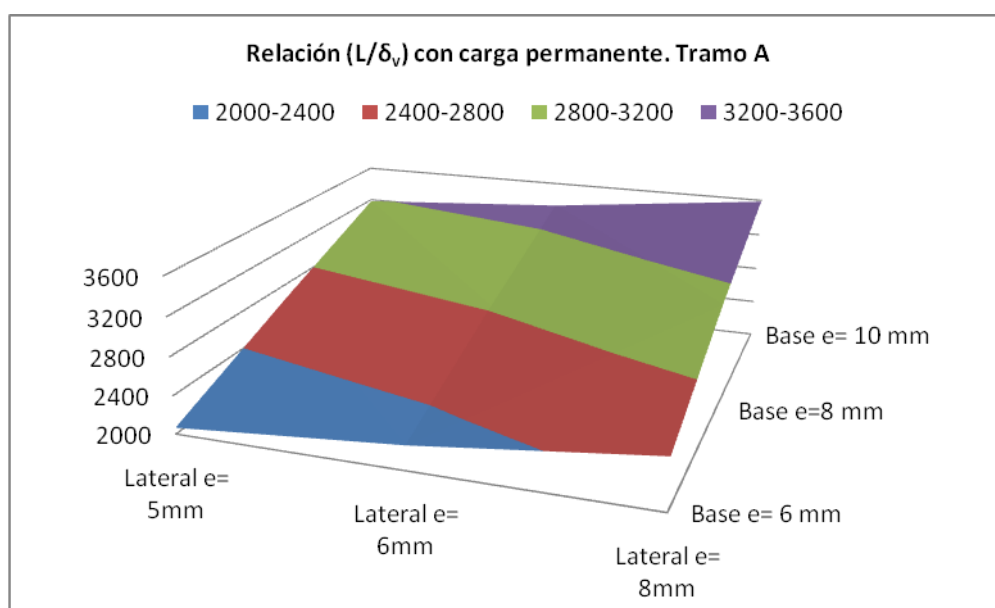


Fig. 29. Relación (L/δ_v) con carga permanente. Tramo A

Desplazamiento máximo vertical con sobrecarga [mm].

Tabla III. Desplazamientos máx. vertical y relación (L/δ_v) con sobrecarga [mm]. Hipótesis ELS-II. Tramo A

Base\Lateral	5	6	8
6	11,30	10,30	9,09
8	8,76	8,12	7,35
10	7,20	6,86	6,32

Base\Lateral	5	6	8
6	923	1013	1147
8	1191	1285	1419
10	1449	1521	1651

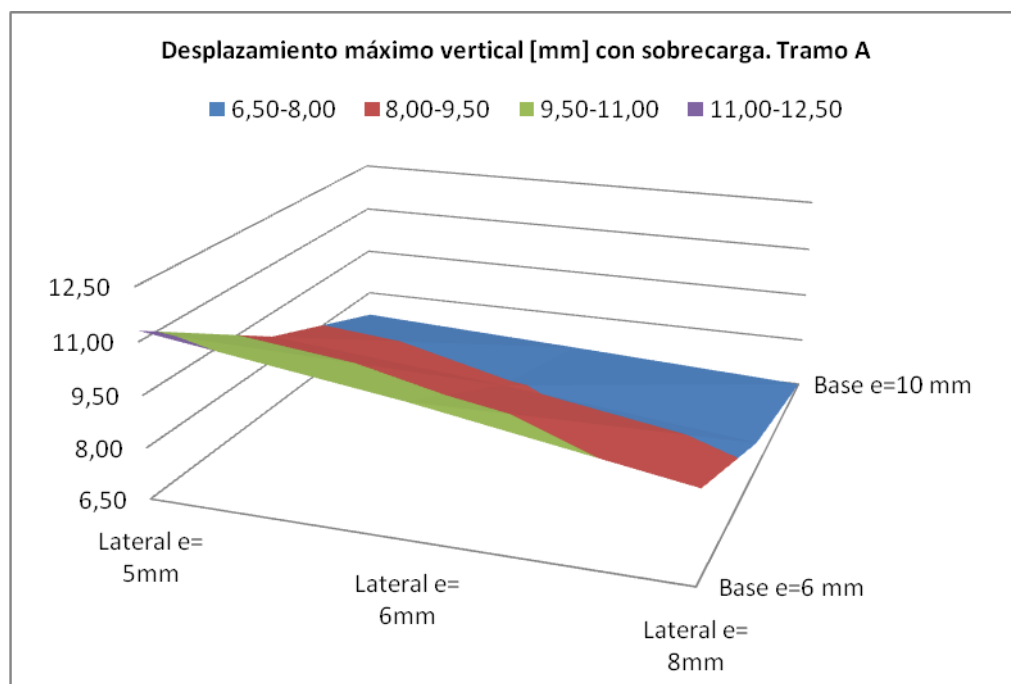


Fig. 30. Desplazamiento máximo vertical [mm] con sobrecarga. Tramo A

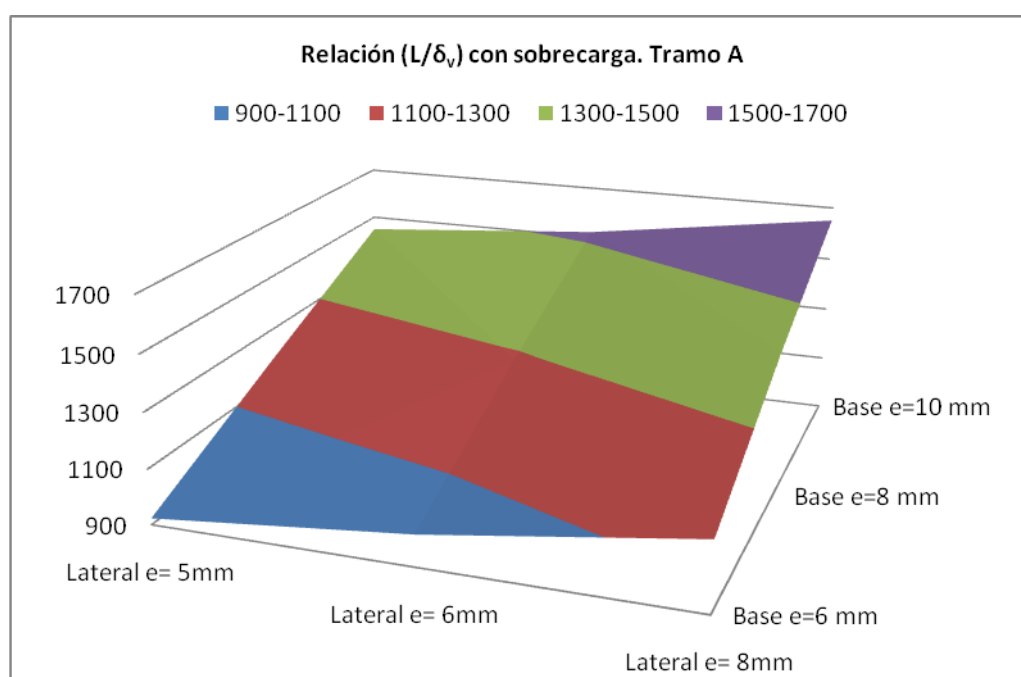


Fig. 31. Relación (L/δ_v) con sobrecarga. Tramo A

Desplazamiento máximo vertical sólo debido a sobrecarga (activo) [mm].

Tabla IV. Desplazamiento máx. activo vertical y relación (L/δ_v) sólo con sobrecarga [mm]. Tramo A

Base\Lateral	5	6	8
6	6,25	5,67	4,96
8	4,81	4,42	4
10	3,92	3,73	3,41

Base\Lateral	5	6	8
6	1669	1840	2103
8	2169	2360	2608
10	2661	2797	3060

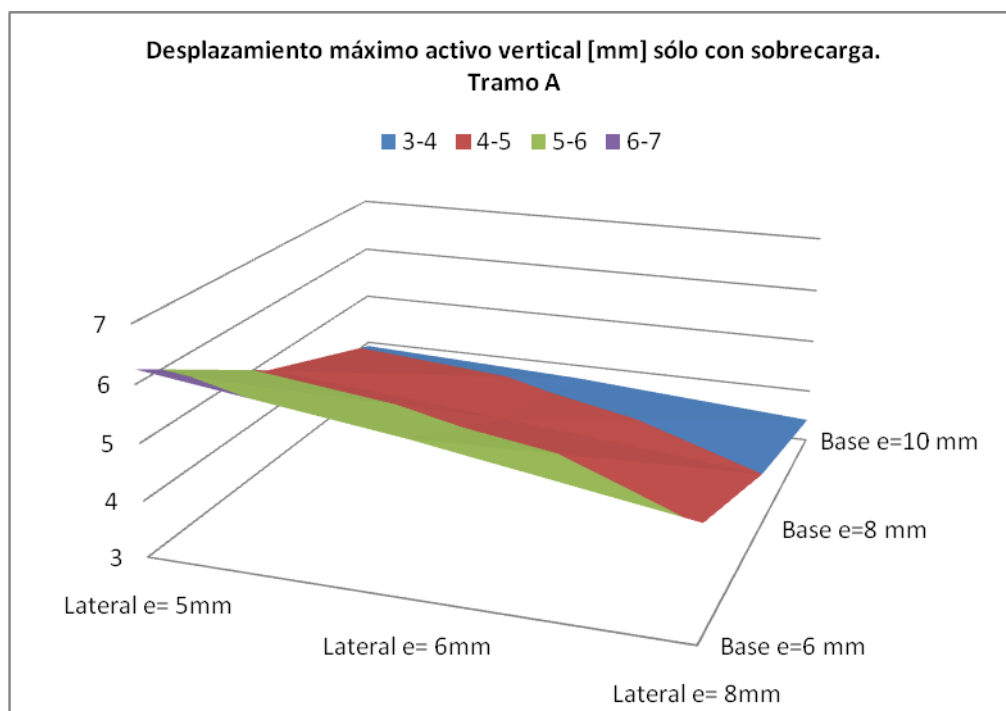


Fig. 32. Desplazamiento máximo activo vertical [mm] sólo con sobrecarga. Tramo A

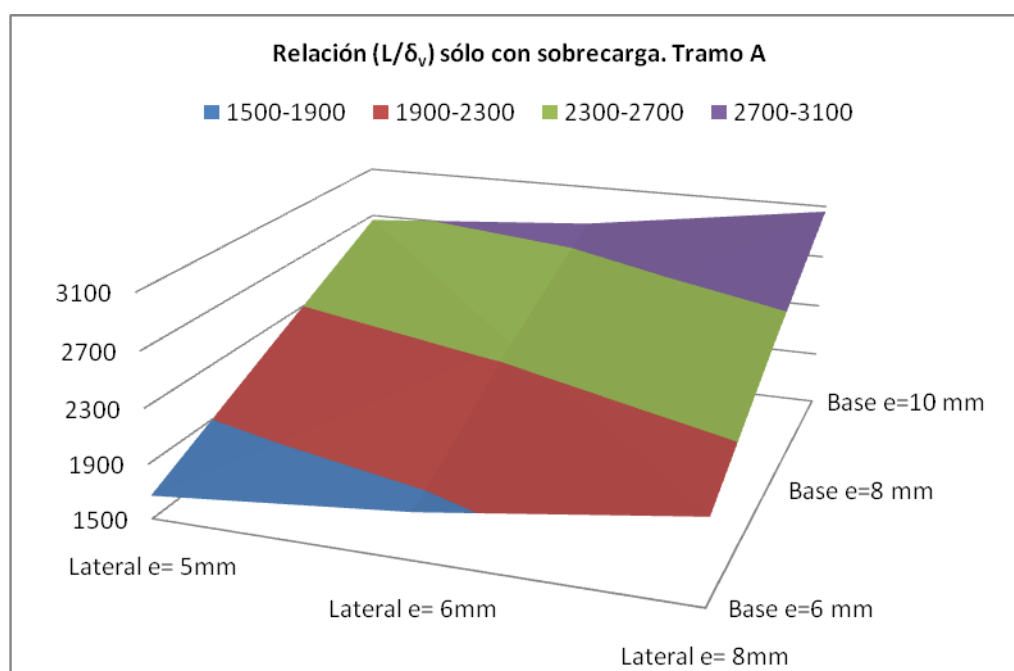


Fig. 33. Relación (L/δ_v) sólo con sobrecarga. Tramo A

Tanto en las tablas anteriores (Tabla II a IV), como en las gráficas (Figs. 28 a 33) se muestran los desplazamientos verticales máximos y la relación luz/desplazamiento vertical en las diferentes hipótesis correspondientes al tramo A.

Como se observan en las Tablas, la relación flecha/luz se mantiene por debajo de 1/750 en la hipótesis con carga permanente (ELS-I) y por debajo de 1/500 con sobrecarga (ELS-II), cumpliendo las restricciones impuestas por normativa.

En el caso de pasarelas, es necesario además comprobar la flecha debida a la actuación de la sobrecarga por el paso de los peatones, establecido por la IAP, en este caso la relación flecha/luz máxima es de 1/1669, manteniéndonos por debajo de 1/1200.

En este caso y según la EAE, no sería necesario verificar el nivel de vibraciones en el tramo A de la pasarela, puesto que satisface el valor límite de deformaciones.

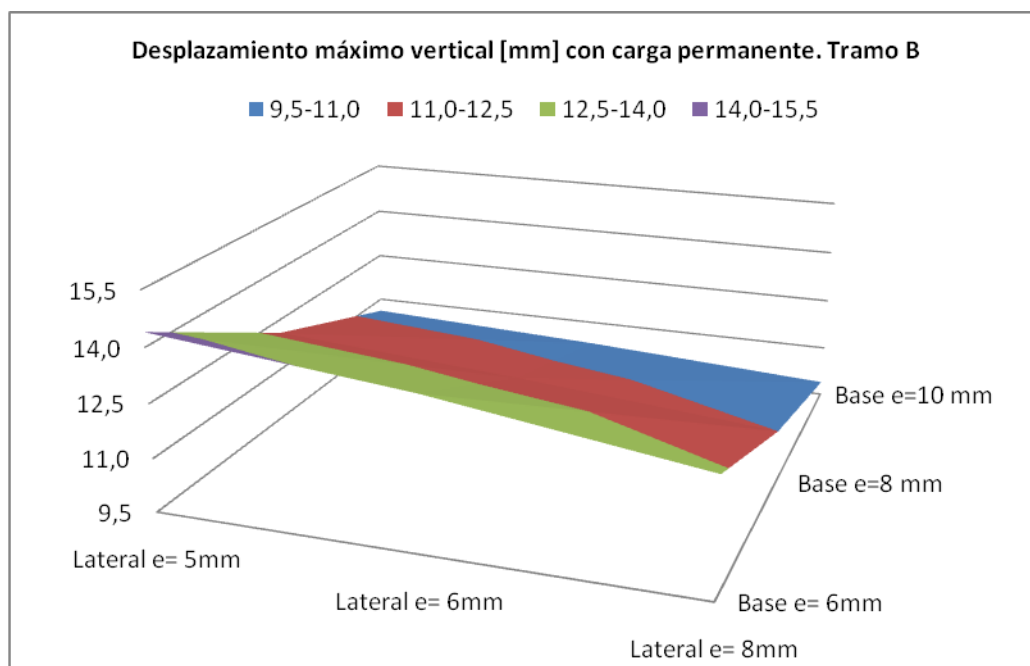
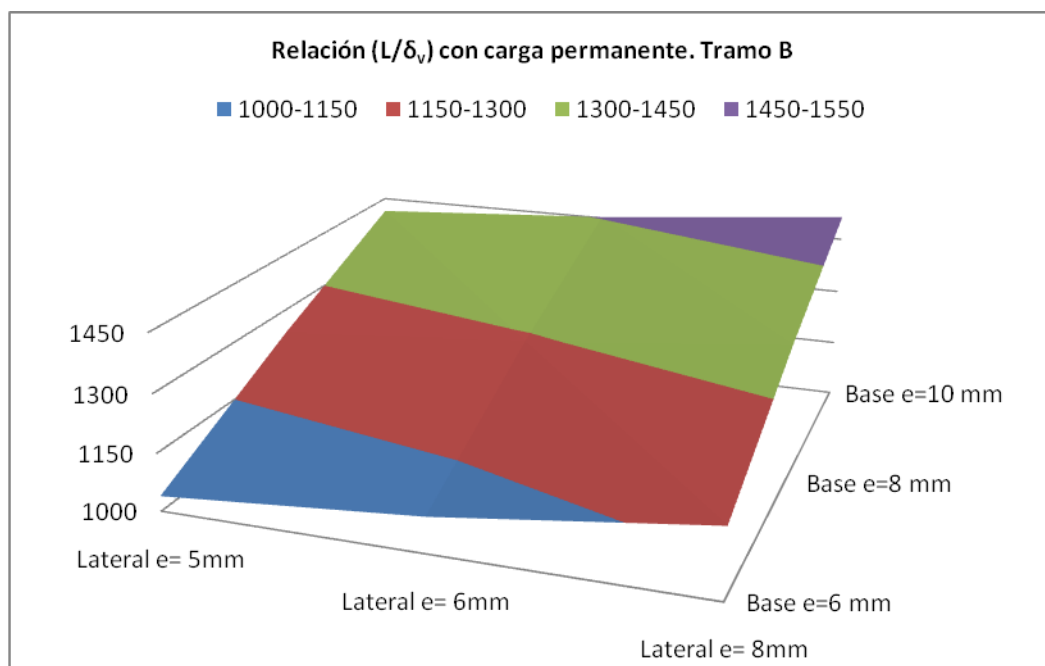
Vemos que, como era de esperar, conforme aumenta el espesor de la viga cajón (chapa base y chapa lateral), disminuye el desplazamiento máximo vertical.

Tramo B

Desplazamiento máximo vertical con carga permanente [mm].

Tabla V. Desplazamiento máx. vertical y relación (L/δ_v) con carga permanente [mm]. Hipótesis ELS-I. Tramo B

Base\Lateral	5	6	8	Base\Lateral	5	6	8
6	14,4	13,7	12,7	6	1039	1092	1178
8	12,1	11,6	11,0	8	1237	1290	1360
10	10,6	10,3	9,9	10	1412	1453	1513

**Fig. 34.** Desplazamiento máximo vertical [mm] con carga permanente. Tramo B**Fig. 35.** Relación (L/δ_v) con carga permanente. Tramo B

Desplazamiento máximo vertical con sobrecarga [mm].

Tabla VI. Desplazamiento máx. vertical y relación (L/δ_v) con sobrecarga [mm]. Hipótesis ELS-II. Tramo B

Base\Lateral	5	6	8
6	33,3	31,4	28,9
8	27,6	26,4	24,6
10	23,9	23,2	21,9

Base\Lateral	5	6	8
6	449	476	517
8	542	567	608
10	626	645	683

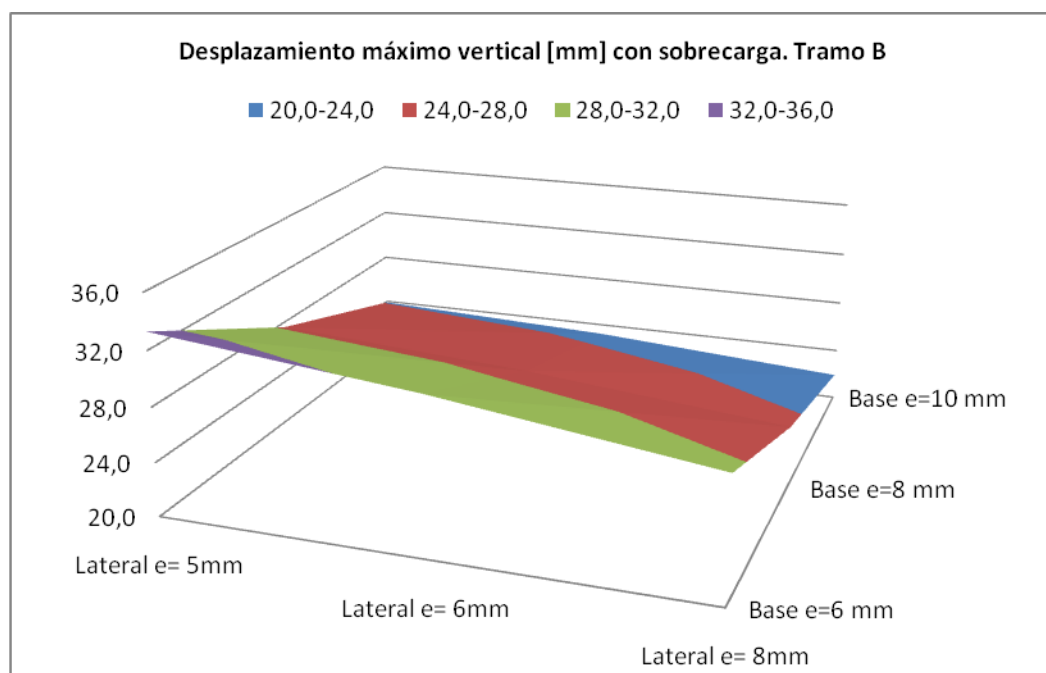


Fig. 36. Desplazamiento máximo vertical [mm] con sobrecarga. Tramo B

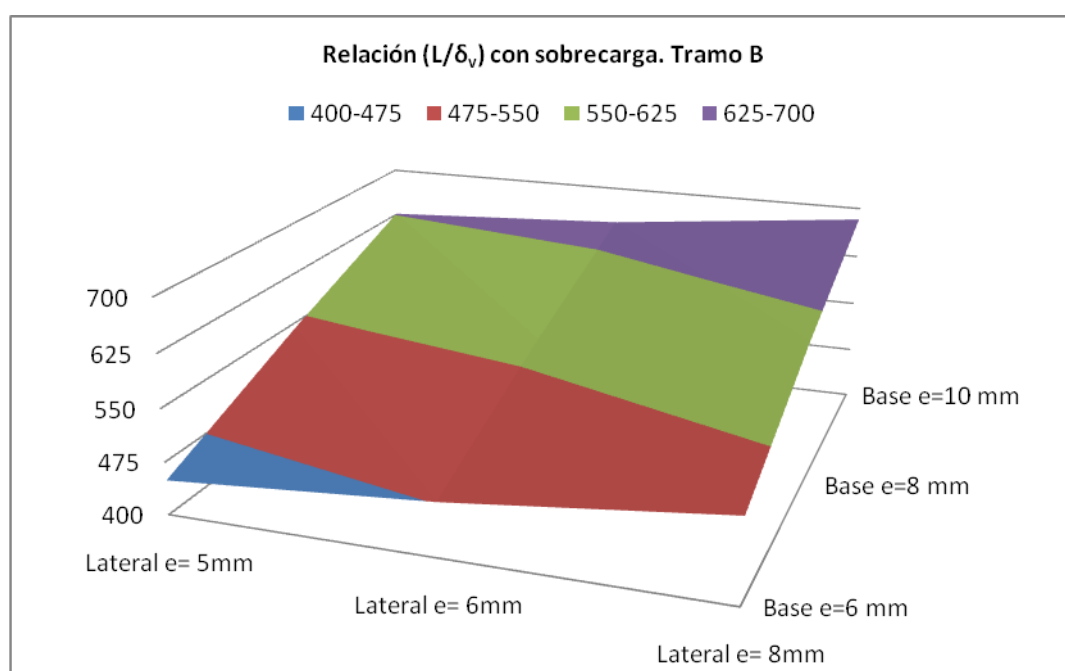


Fig. 37. Relación (L/δ_v) con sobrecarga. Tramo B

Desplazamiento máximo activo vertical sólo debida a sobrecarga [mm].

Tabla VII. Desplazamiento máx. activo vertical y relación (L/δ_v) sólo con sobrecarga [mm]. Tramo B

Base\Lateral	5	6	8
6	18,9	17,7	16,2
8	15,5	14,8	13,6
10	13,3	12,9	12,01

Base\Lateral	5	6	8
6	792	845	924
8	965	1011	1100
10	1125	1160	1246

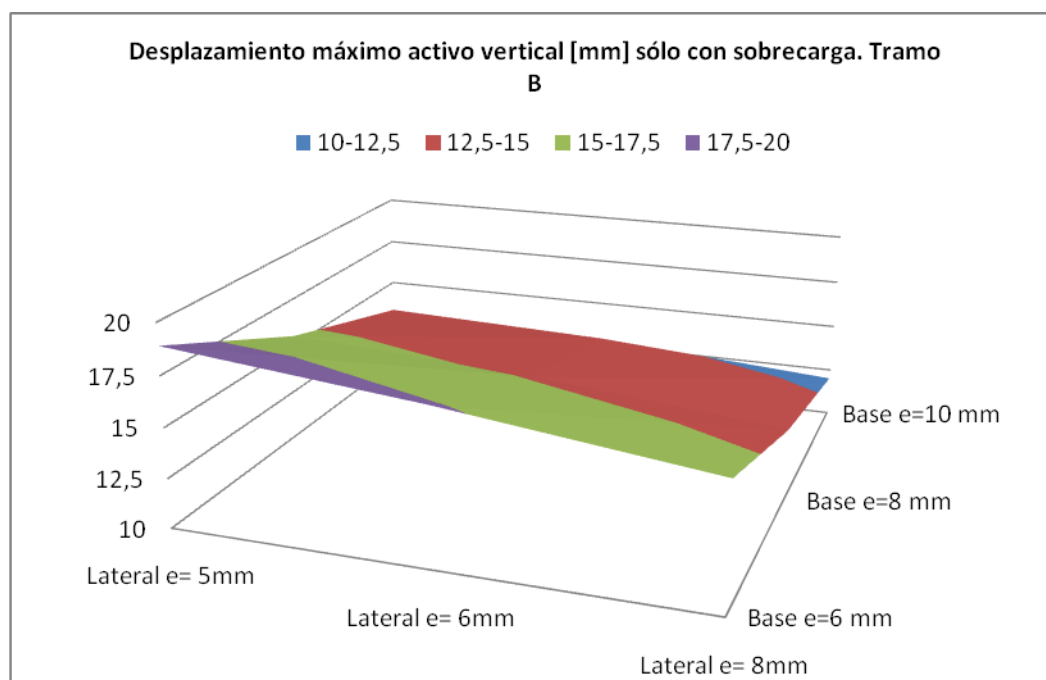


Fig. 38. Desplazamiento máximo activo vertical [mm] sólo con sobrecarga. Tramo B

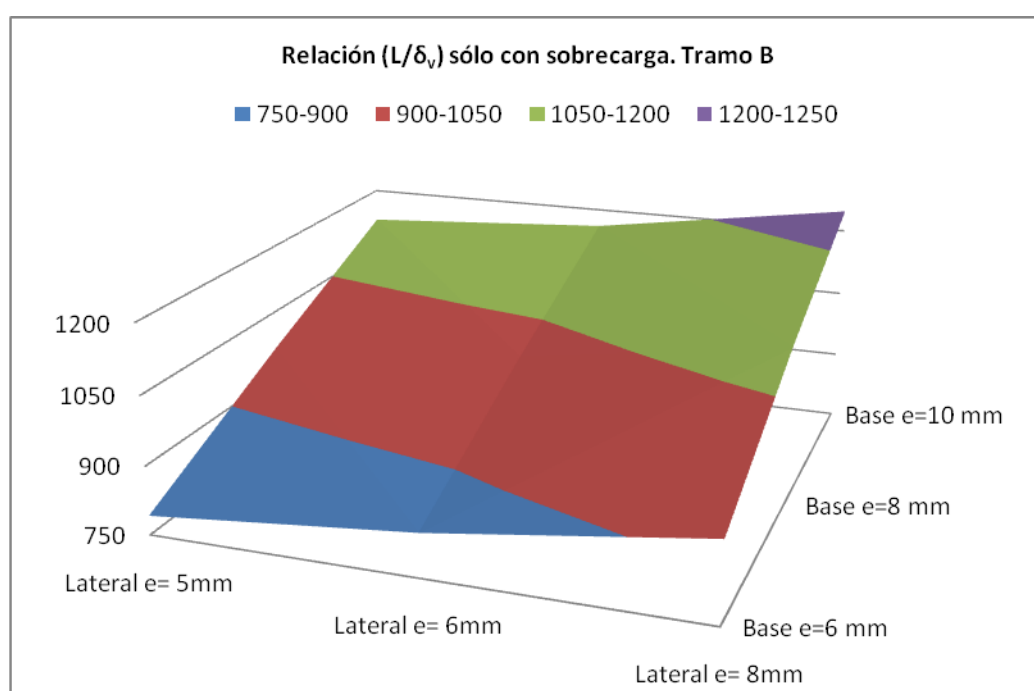


Fig. 39. Relación (L/δ_v) sólo con sobrecarga. Tramo B

Tanto en las tablas anteriores (Tabla V a VII), como en las gráficas (Figs. 34 a 39) se muestran los desplazamientos verticales máximos y la relación luz/desplazamiento vertical en las diferentes hipótesis correspondientes al tramo B.

Como se observan en las Tablas, la relación flecha/luz se mantiene por debajo de $1/750$ en la hipótesis con carga permanente (ELS-I), sin embargo considerando además sobrecarga (ELS-II) y con un espesor de chapa base de 6 mm y para un espesor de chapa lateral de 5 mm y 6 mm se supera el límite de $1/500$, no cumpliendo las restricciones impuestas por normativa.

En el caso de pasarelas, es necesario además comprobar la flecha debida a la actuación de la sobrecarga por el paso de los peatones, establecido por la IAP, en este caso la relación flecha/luz máxima se mantiene por encima de $1/1200$, excepto para un espesor de chapa base de 10mm y un espesor de chapa lateral de 8mm.

En este caso y según la EAE, si sería necesario verificar el nivel de vibraciones en el tramo B de la pasarela, puesto que no satisface el valor límite de deformaciones.

Vemos que, como era de esperar, conforme aumenta el espesor de la viga cajón (chapa base y chapa lateral), disminuye el desplazamiento máximo vertical.

Tramo A (ELU-II)**Tabla VIII.** Tensión máxima chapa lateral y chapa base [MPa]. Tramo A

Base\Lateral	5	6	8
6	110	98,2	81,6
8	86,2	80,9	70,1
10	67,8	66,1	60,5

Base\Lateral	5	6	8
6	91,4	91,3	89,4
8	72,9	70,3	66,5
10	62,2	60,4	57,1

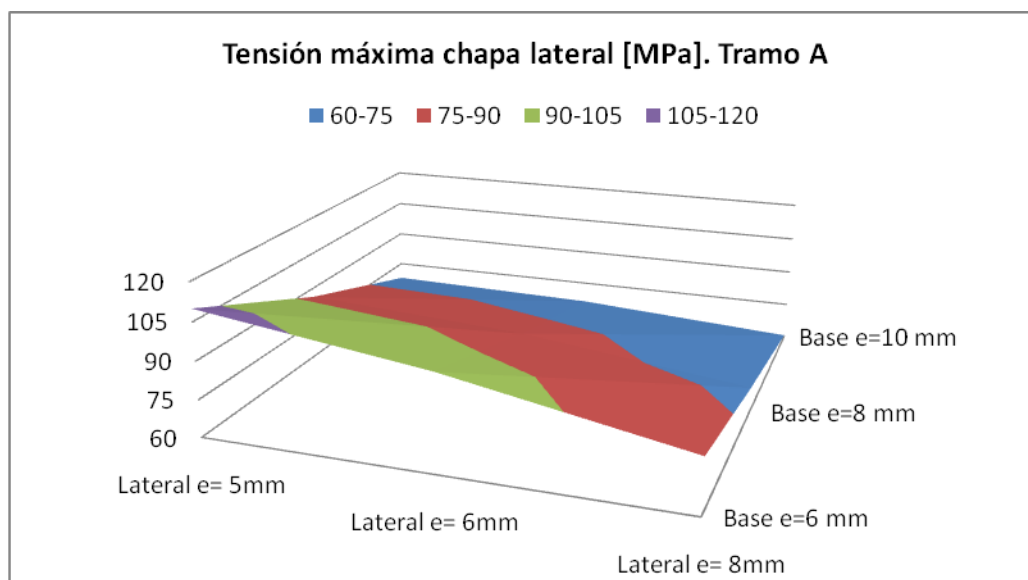
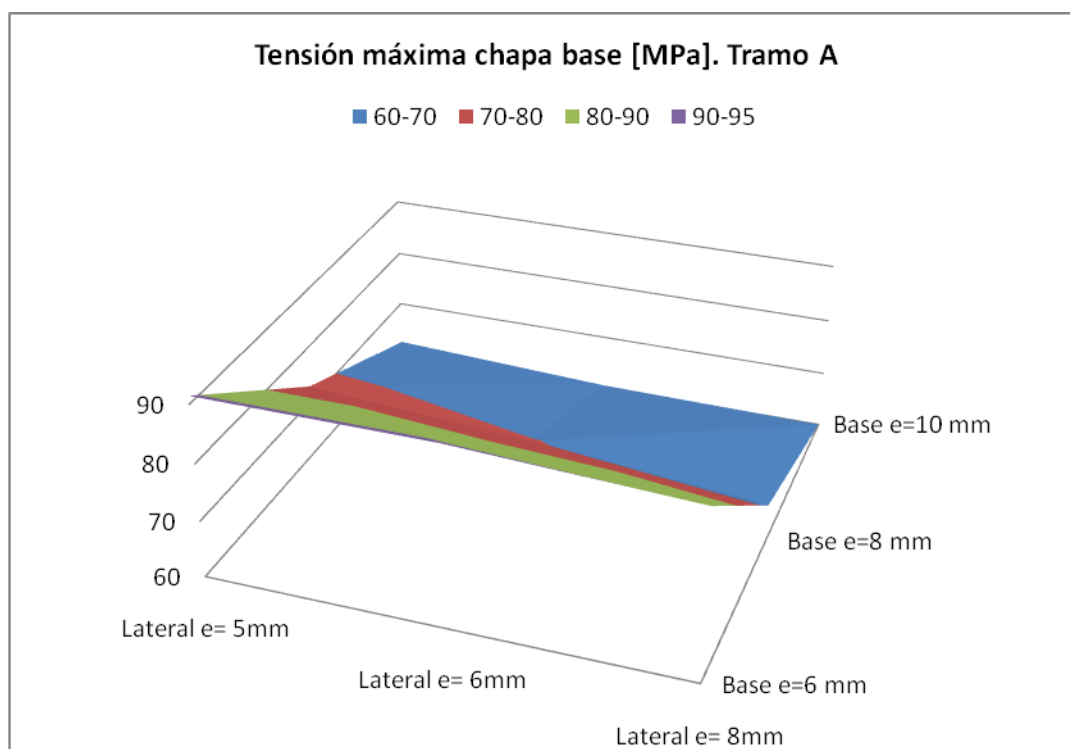
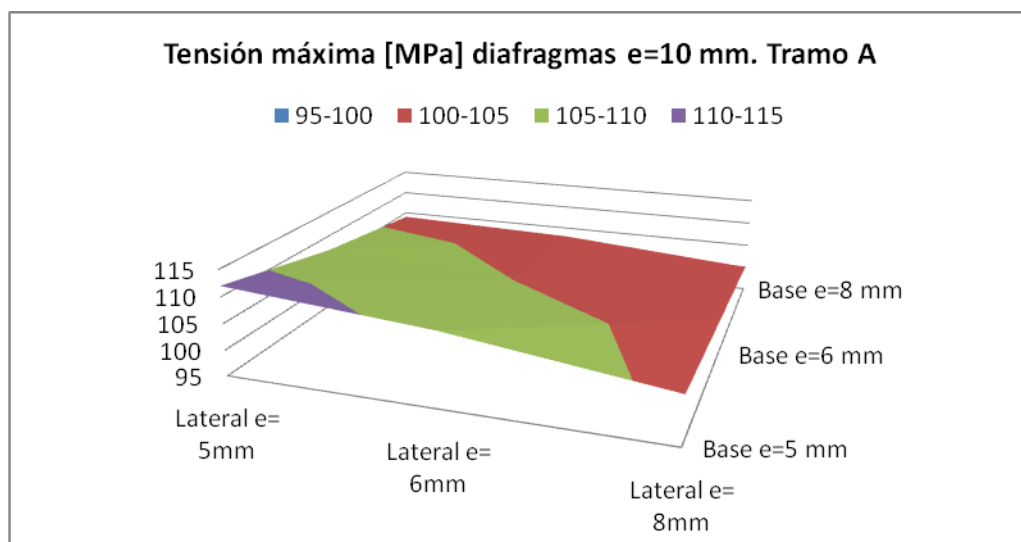
**Fig. 40.** Tensión máxima chapa lateral [MPa]. Tramo A**Fig. 41.** Tensión máxima chapa base [MPa]. Tramo A

Tabla IX. Tensión máxima [MPa] diafragma e=10mm. Tramo A

Base\Lateral	5	6	8
6	112	109	104
8	107	105	102
10	104	103	100

**Fig. 42.** Tensión máxima [MPa] diafragmas e=10mm. Tramo A**Tabla X.** Tensión máxima [MPa] diafragma e=15mm. Tramo A

Base\Lateral	5	6	8
6	9,34	9,27	9,1
8	8,61	8,53	8,33
10	8,24	8,1	7,86

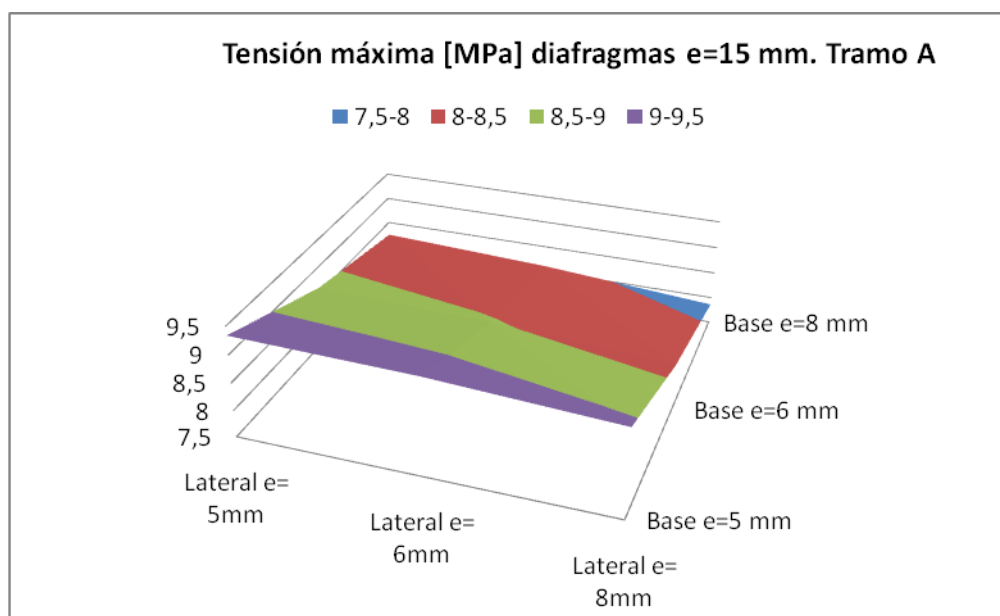
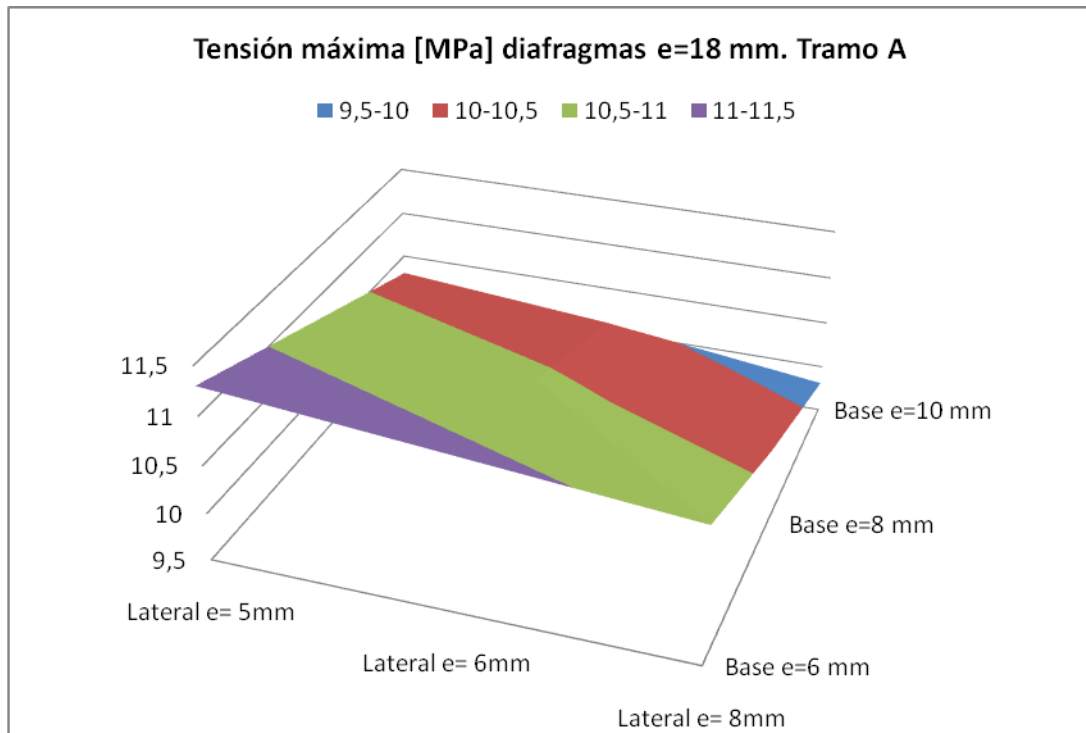
**Fig. 43.** Tensión máxima [MPa] diafragmas e=15mm. Tramo A

Tabla XI. Tensión máxima [MPa] diafragma e=18mm. Tramo A

Base\Lateral	5	6	8
6	11,3	11,1	10,9
8	10,8	10,6	10,3
10	10,3	10,1	9,81

**Fig. 44.** Tensión máxima [MPa] diafragmas e=18mm. Tramo A

Tanto en las tablas anteriores (Tabla VIII a XI), como en las gráficas (Figs. 40 a 44) se muestran las tensiones máximas en la viga cajón (chapa base y lateral) y en los diferentes diafragmas correspondientes al tramo A.

Conforme aumentamos el espesor de la chapa base y chapa lateral, la estructura es más robusta y disminuyen las tensiones, tanto en la chapa base, chapa lateral, como en los diafragmas.

Tramo B (ELU-II)**Tabla XII.** Tensión máxima chapa lateral y chapa base [MPa]. Tramo B

Base\Lateral	5	6	8
6	177	171	161
8	142	138	132
10	118	116	112

Base\Lateral	5	6	8
6	179	170	156
8	147	141	131
10	125	121	114

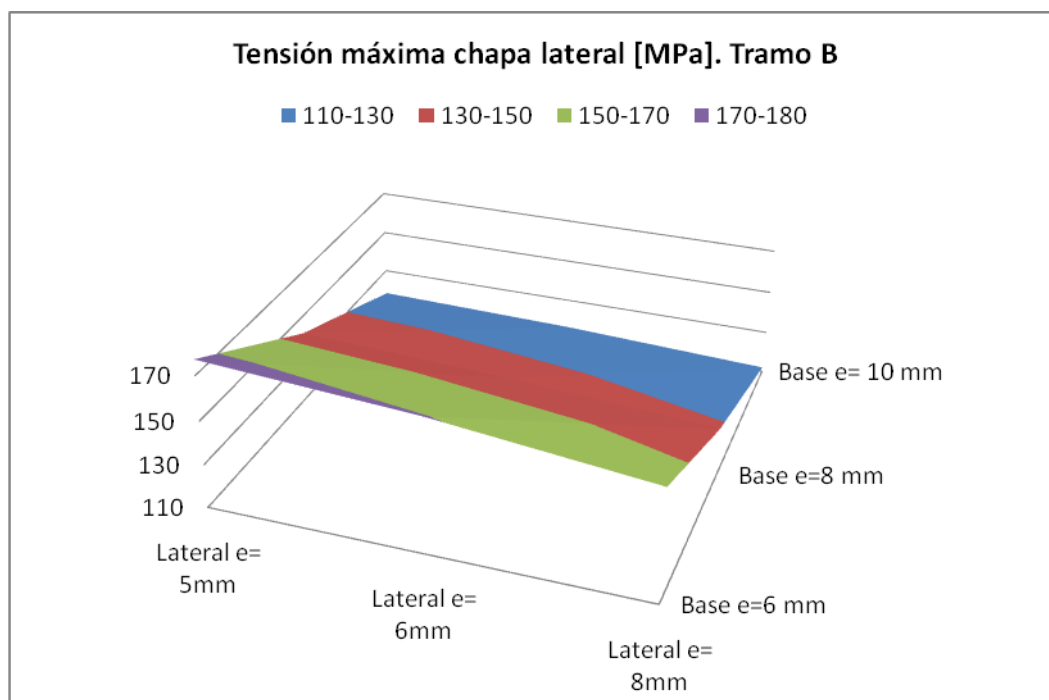
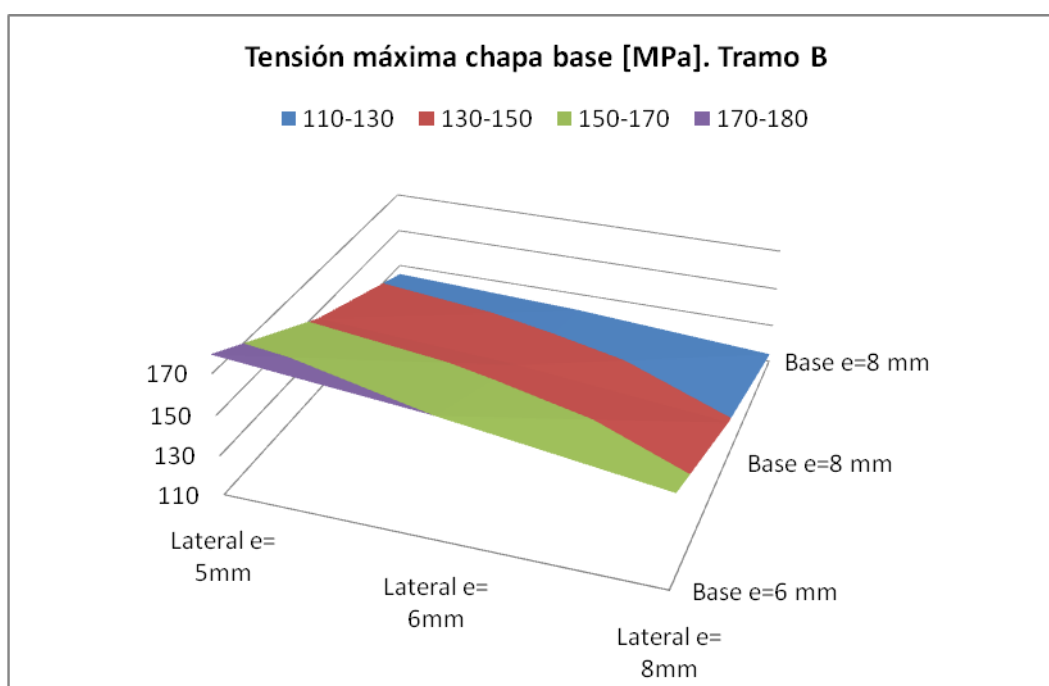
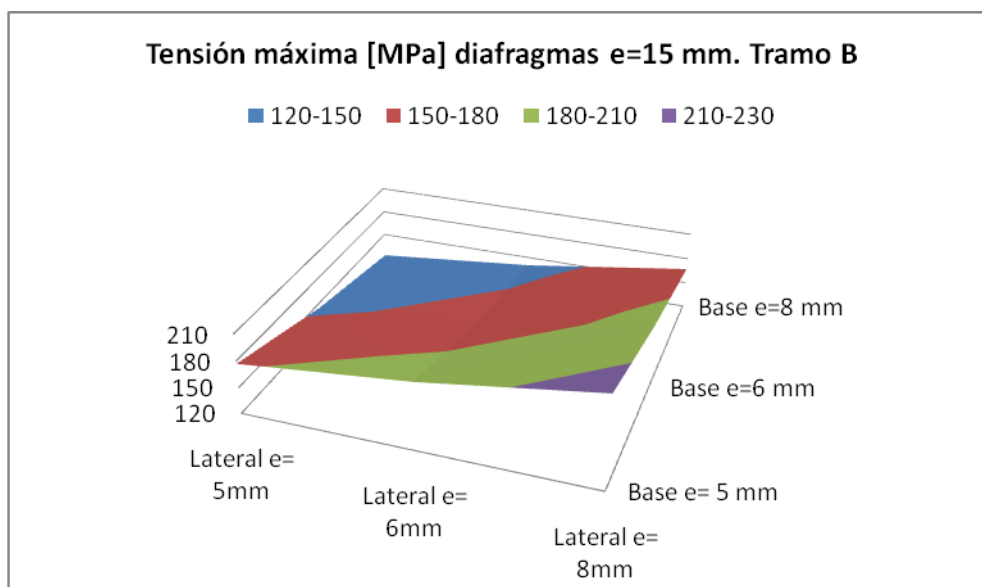
**Fig. 45.** Tensión máxima chapa lateral [MPa]. Tramo B**Fig. 46.** Tensión máxima chapa base [MPa]. Tramo B

Tabla XIII. Tensión máxima [MPa] diafragma e=15mm. Tramo B

Base\Lateral	5	6	8
6	177	196	224
8	144	162	191
10	122	140	167

**Fig. 47.** Tensión máxima [MPa] diafragmas e=15mm. Tramo B**Tabla XIV.** Tensión máxima [MPa] diafragma e=20mm. Tramo B

Base\Lateral	5	6	8
6	14,7	14,4	14,1
8	13,7	13,4	13
10	13	12,7	12,2

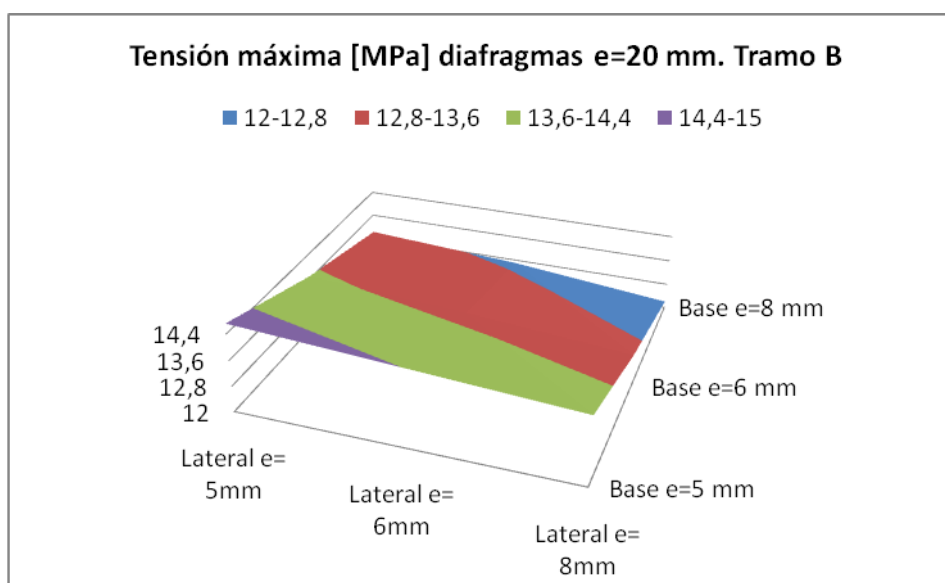
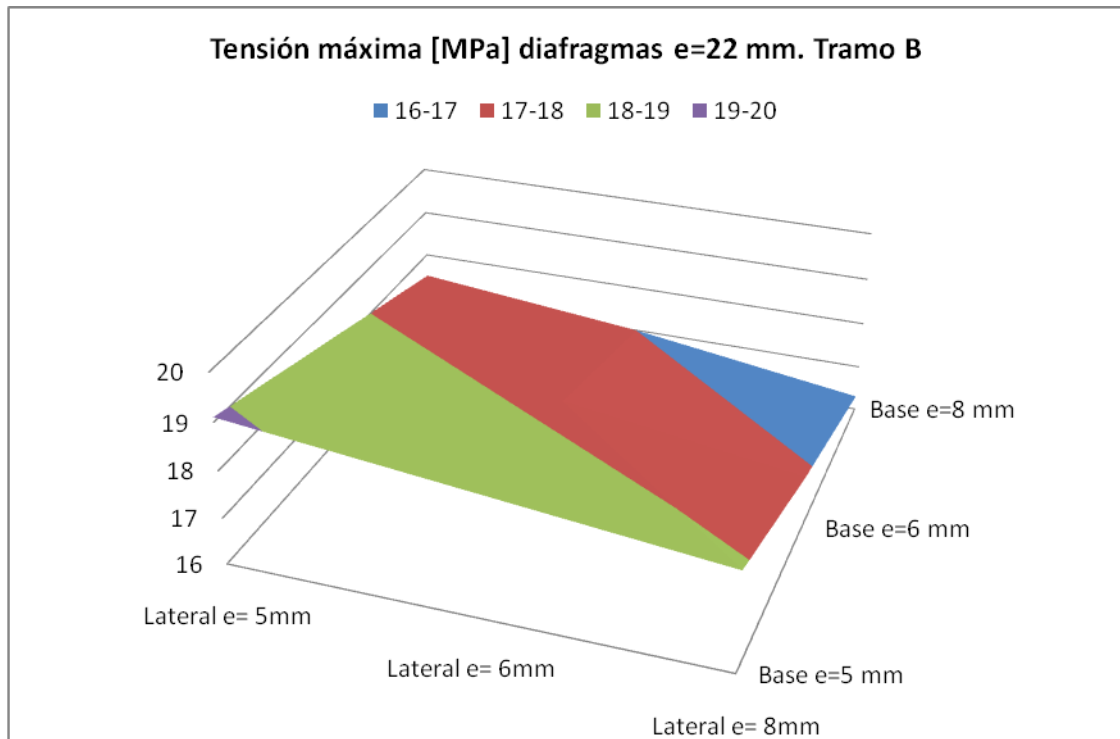
**Fig. 48.** Tensión máxima [MPa] diafragmas e=20mm. Tramo B

Tabla XV. Tensión máxima [MPa] diafragma e=22mm. Tramo B

Base\Lateral	5	6	8
6	19,1	18,6	18,1
8	18,3	17,8	17,1
10	17,5	17	16,3

**Fig. 49.** Tensión máxima [MPa] diafragmas e=22mm. Tramo B

Tanto en las tablas anteriores (Tabla XII a XV), como en las gráficas (Figs. 45 a 49) se muestran las tensiones máximas en la viga cajón (chapa base y lateral) y en los diferentes diafragmas correspondientes al tramo B.

Conforme aumentamos el espesor de la chapa base y chapa lateral, la estructura es más robusta y disminuyen las tensiones, tanto en la chapa base, chapa lateral, como en los diafragmas.

Para ambos tramos, las tensiones permanecen siempre por debajo del límite elástico del material ($275/1.05=261.9$ MPa).

2.2.2. Análisis de estabilidad

Tramo A

Tabla XVI. Carga crítica de abolladura. Tramo A

Base\Lateral	5	6	8
6	9,680	16,143	35,510
8	9,458	15,833	34,847
10	9,223	15,505	34,286

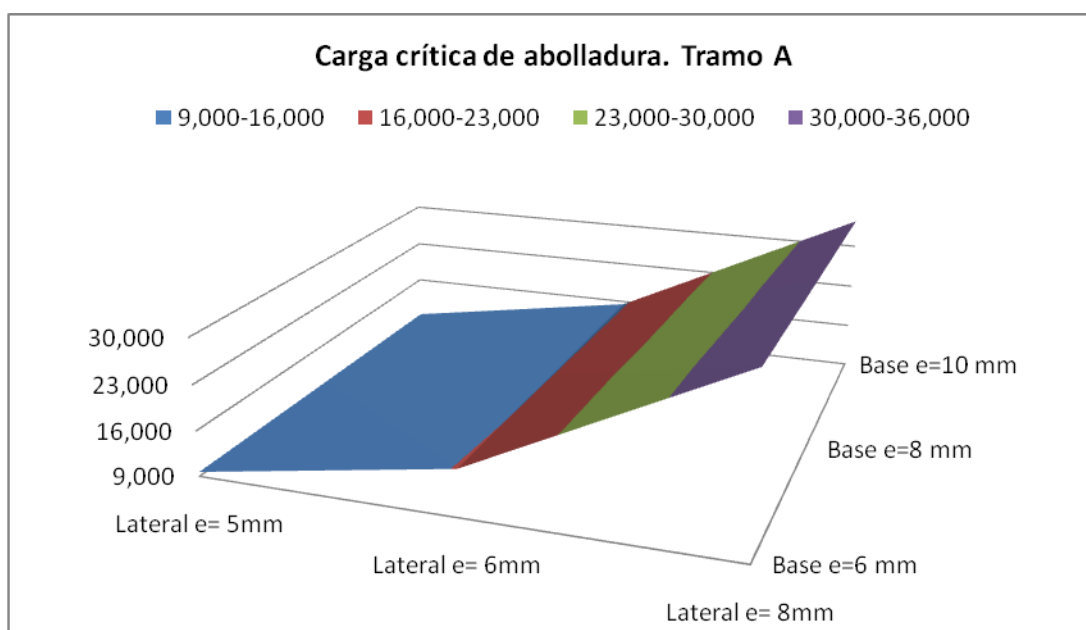


Fig. 50. Carga crítica de abolladura. Tramo A

Tramo B

Tabla XVII. Carga crítica de abolladura. Tramo B

Base\Lateral	5	6	8
6	6,605	10,948	10,848
8	6,581	11,035	24,279
10	6,470	10,940	24,404

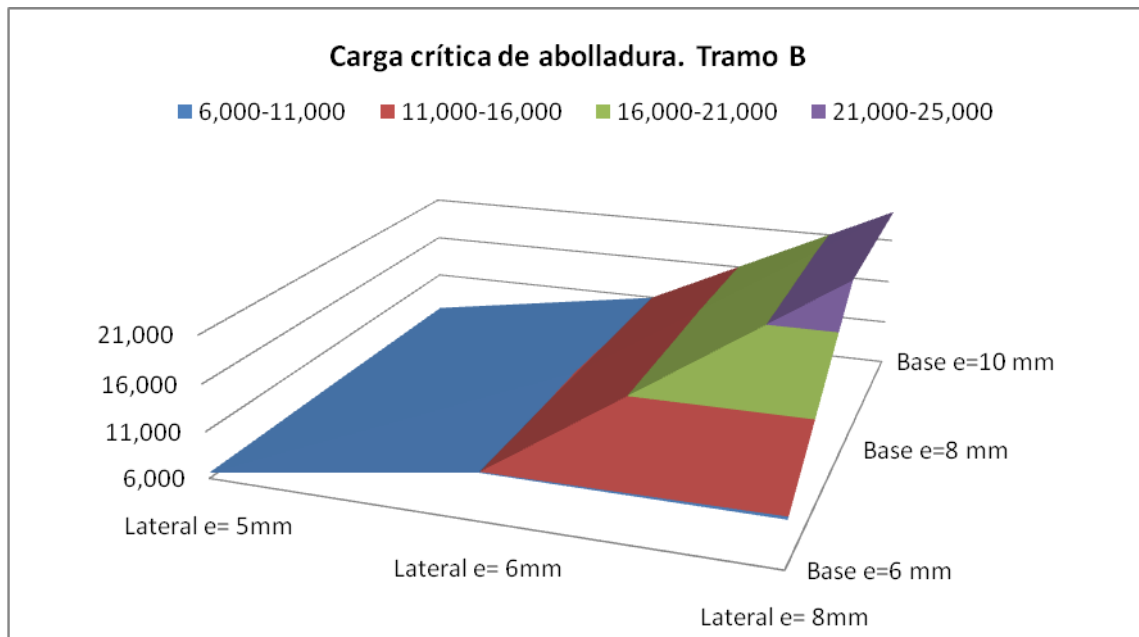


Fig. 51. Carga crítica de abolladura. Tramo B

Tanto en las tablas anteriores (Tabla XVI a XVII), como en las gráficas (Figs. 50 a 51) se muestran los valores máximos de carga crítica de abolladura correspondientes al tramo A y B.

Conforme aumentamos el espesor de la chapa base y chapa lateral, aumenta el valor de la carga crítica.

Para el tramo A tenemos un valor mínimo de $\lambda_{crf}=9.22$ y para el tramo B un valor de $\lambda_{crf}=6.47$, ambos por encima de 6, valor mínimo exigido por los requisitos iniciales del proyecto.

2.2.3. Análisis de vibraciones

Tramo A

Tabla XVIII. Frecuencia natural de vibración [Hz]. Tramo A

Base\Lateral	5	6	8
6	9,600	9,789	10,062
8	10,331	10,487	10,718
10	10,922	11,048	11,239

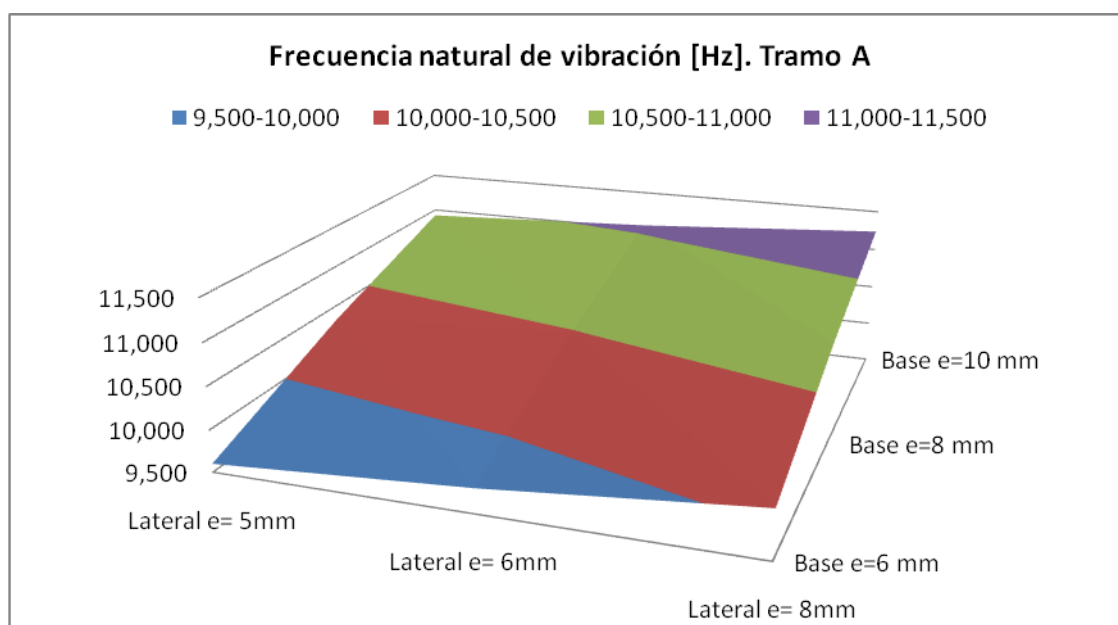


Fig. 52. Frecuencia natural de vibración [Hz]. Tramo A

Tramo B

Tabla XIX. Frecuencia natural de vibración [Hz]. Tramo B

Base\Lateral	5	6	8
6	4,980	5,058	5,185
8	5,343	5,407	5,508
10	5,634	5,686	5,768

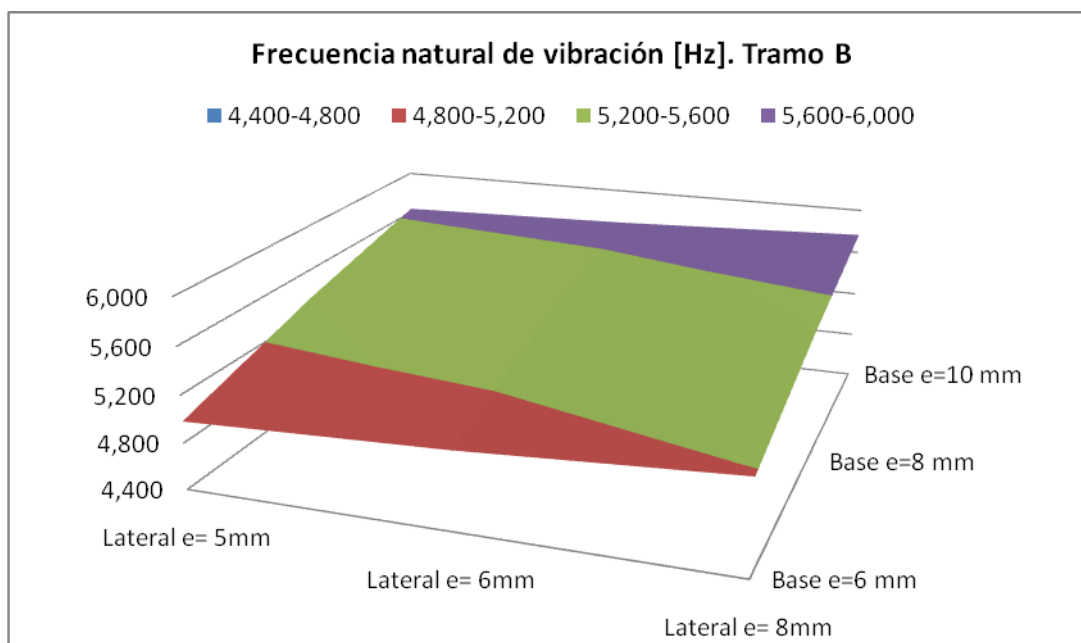


Fig. 53. Frecuencia natural de vibración [Hz]. Tramo B

Tanto en las tablas anteriores (Tabla XVIII a XIX), como en las gráficas (Figs. 52 a 53) se muestran las frecuencias naturales de vibración correspondientes al tramo A y B.

Conforme aumentamos el espesor de la chapa base y chapa lateral, aumenta el valor de la primera frecuencia de vibración.

Para el tramo A tenemos una frecuencia mínima de 9.6 Hz y para el tramo B un valor de 4.98 Hz, ambas frecuencias se sitúan fuera del rango crítico (4.60 Hz), por lo tanto no resulta necesario efectuar ningún análisis dinámico adicional.

Realizado el análisis de sensibilidad y sacadas las conclusiones pertinentes, podemos elegir las variables de diseño adecuadas que minimicen el peso global de la pasarela (función objetivo).

Respecto al tramo A, hemos podido observar cómo se cumplen las condicionantes de funcionamiento (análisis estático, estabilidad y vibraciones). Sin embargo en el tramo B para determinados espesores de la viga cajón los desplazamientos máximos verticales no cumplen los requisitos de normativa considerando todas las cargas normales.

Los espesores que minimizan el peso global de la estructura, serían espesor de chapa base 8 mm y espesor de chapa lateral 5 mm.

Sin embargo aumentando el espesor de la chapa lateral a 6 mm, vemos cómo la frecuencia natural aproximadamente es la misma, sin embargo el valor de carga crítica aumenta un 1.6%.

Por tanto ante un posible aumento de la sobrecarga (por si en el futuro se pone algún tipo de solera antideslizante), elegimos como variables de diseño un espesor de chapa base de 8 mm y un espesor de chapa lateral de 6 mm.

En las figuras siguientes (Figs. 54 y 55) podemos observar cómo evoluciona la función objetivo en función de los espesores de la chapa base y chapa lateral.

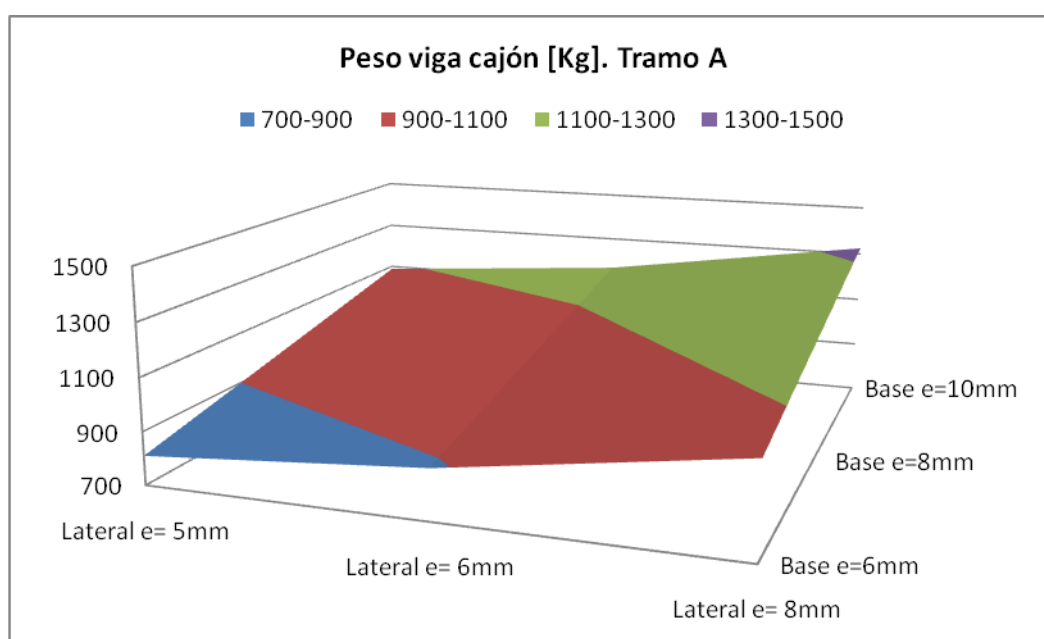


Fig. 54. Función objetivo. Peso viga cajón [Kg]. Tramo A

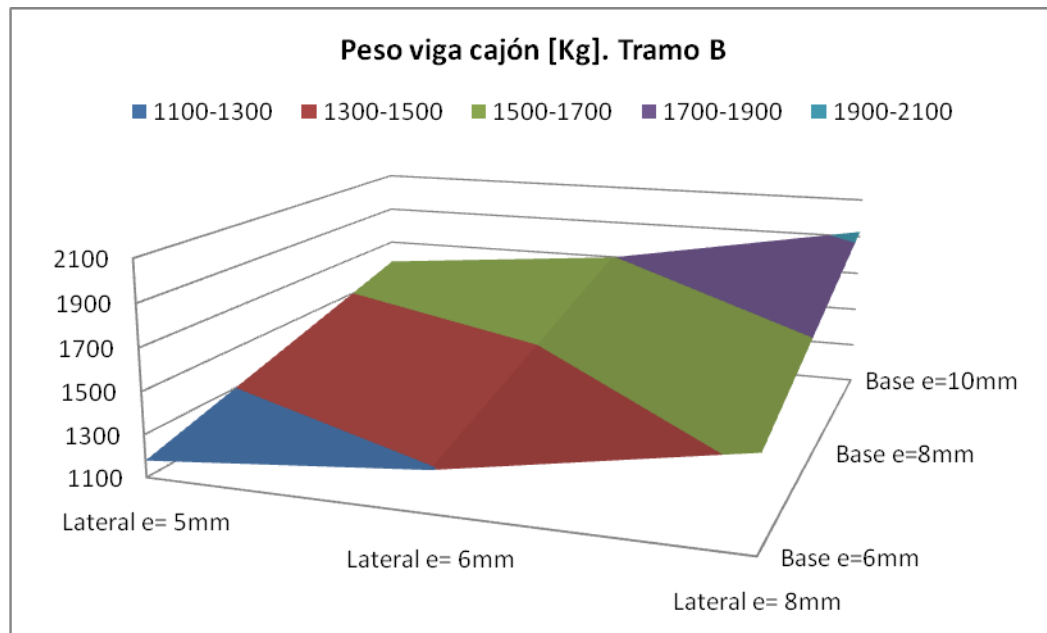


Fig. 55. Función objetivo. Peso viga cajón [Kg]. Tramo B

Con las variables de diseño elegidas, incluyendo todos los elementos que componen la viga cajón, finalmente tenemos un peso total de 6374.45 Kg en el tramo A y 8877.78 Kg en el tramo B.

3. DISEÑO FINAL. MODELO DE CÁLCULO

Se presenta en este epígrafe el modelo de cálculo utilizado para caracterizar el comportamiento resistente de la pasarela.

3.1. Modelo geométrico, discretización y materiales

Se realiza un modelo completo de la pasarela mediante elementos tipo SHELL (placa sometida a flexión), que incluye tanto los elementos principales de la viga cajón, como todas las cartelas y diafragmas. Además, el modelo se completa con el forjado colaborante, que constituye un diafragma rígido frente a acciones horizontales, mallado con elementos tipo BRICK (hexaedro de 8 nudos con aproximación lineal). La malla consta de un total de 69430 elementos y de 60924 nudos, con un total de 365544 grados de libertad, para el tramo A. En el tramo B, la malla consta de un total de 91396 elementos y de 80388 nudos, con un total de 482328 grados de libertad.

El acero (S-275) se ha definido como un material con comportamiento elástico, con un módulo de Young de 210000 MPa y un coeficiente de Poisson de 0.3. La densidad es de 7850 kg/m³. El hormigón del forjado colaborante (HA-25) se ha definido igualmente como un material con comportamiento elástico, con un módulo de Young (secante) de 27264 MPa y un coeficiente de Poisson de 0.2.

Todos los elementos van soldados entre sí con penetración completa, por lo que todas las uniones entre elementos se consideran como rígidas.

En las Figs. 56 a 91 se muestra el modelo de elementos finitos descrito, tanto a nivel global como a nivel de los diferentes detalles.

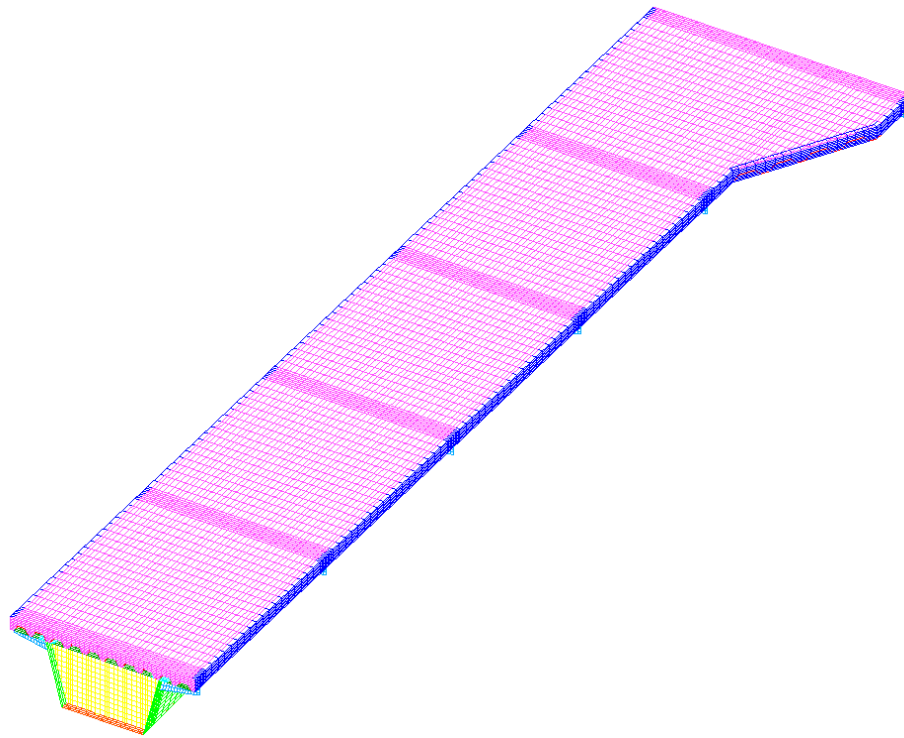


Fig. 56. Modelo de elementos finitos. Vista en sólido. Tramo A

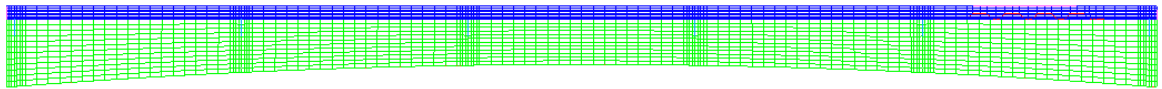


Fig. 57. Modelo de elementos finitos. Alzado. Tramo A

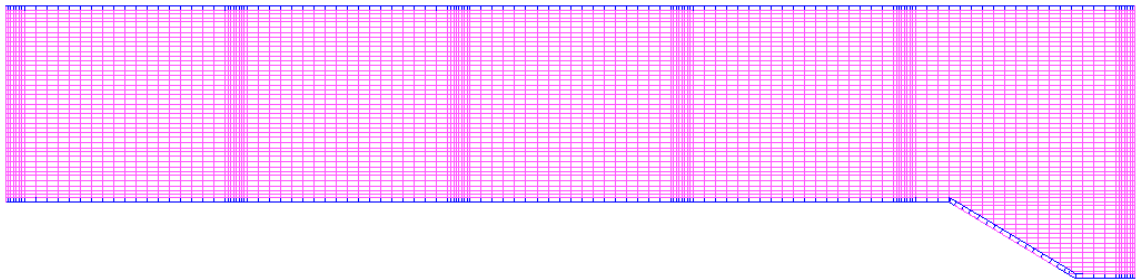


Fig. 58. Modelo de elementos finitos. Planta. Tramo A

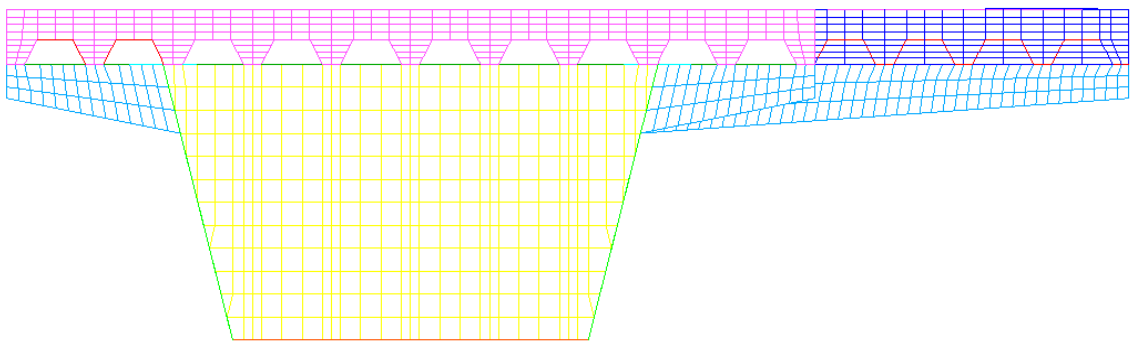


Fig. 59. Modelo de elementos finitos. Vista longitudinal. Tramo A

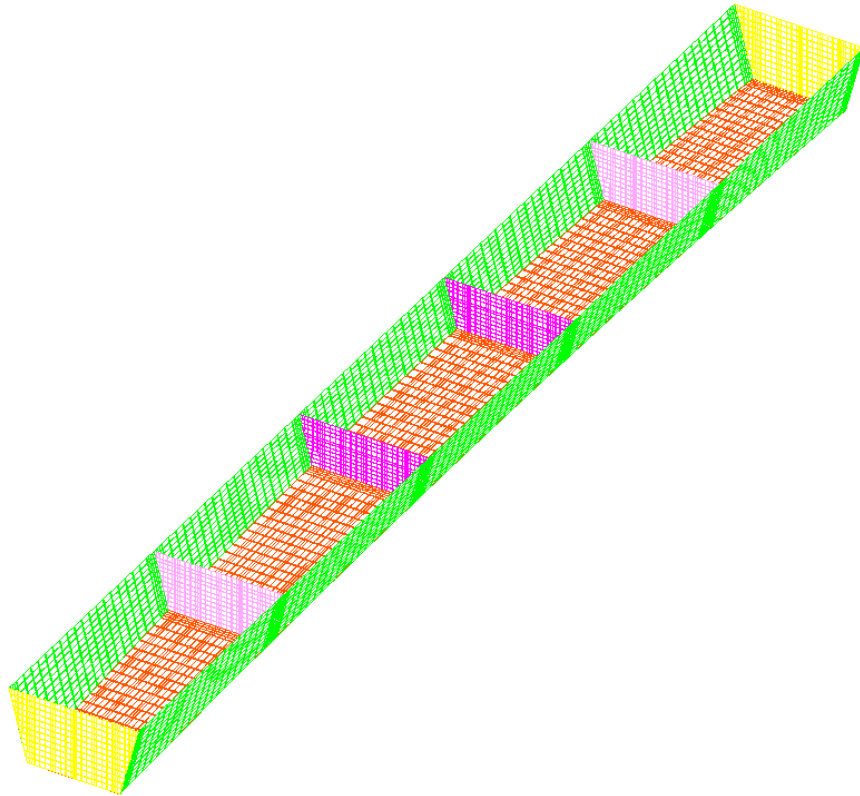


Fig. 60. Modelo de elementos finitos. Viga cajón y diafragmas. Tramo A

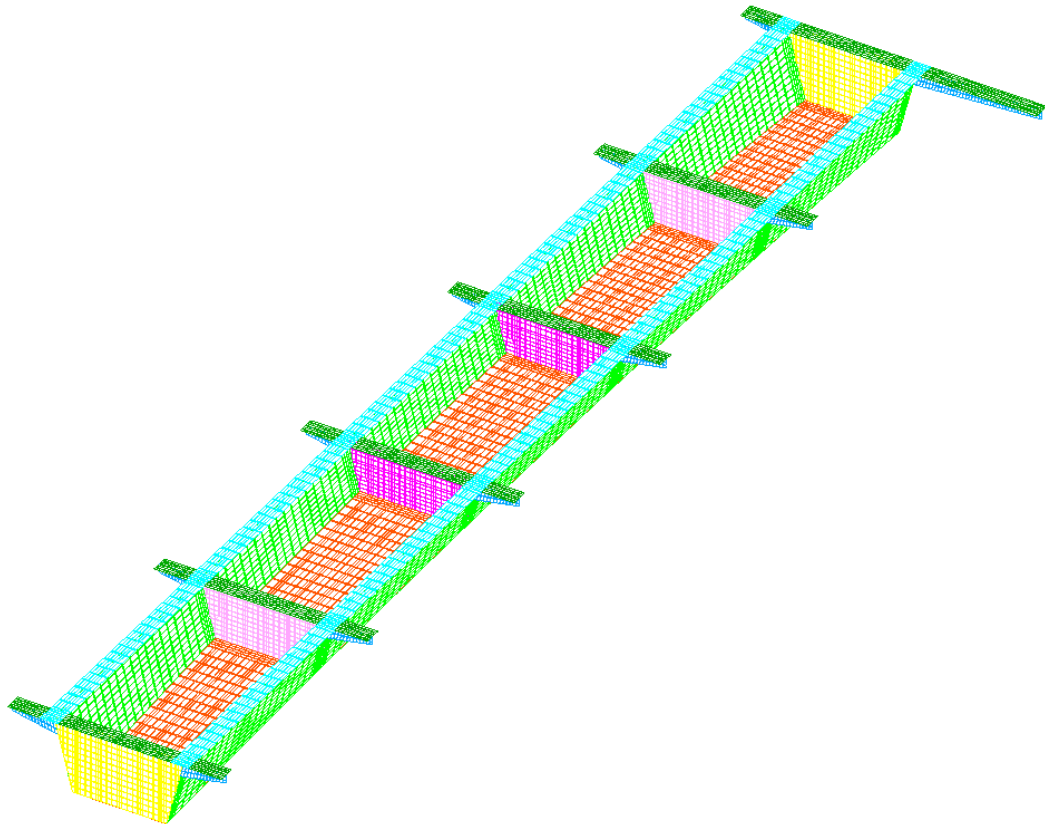


Fig. 61. Modelo de elementos finitos. Viga cajón, diafragmas y vuelos. Tramo A

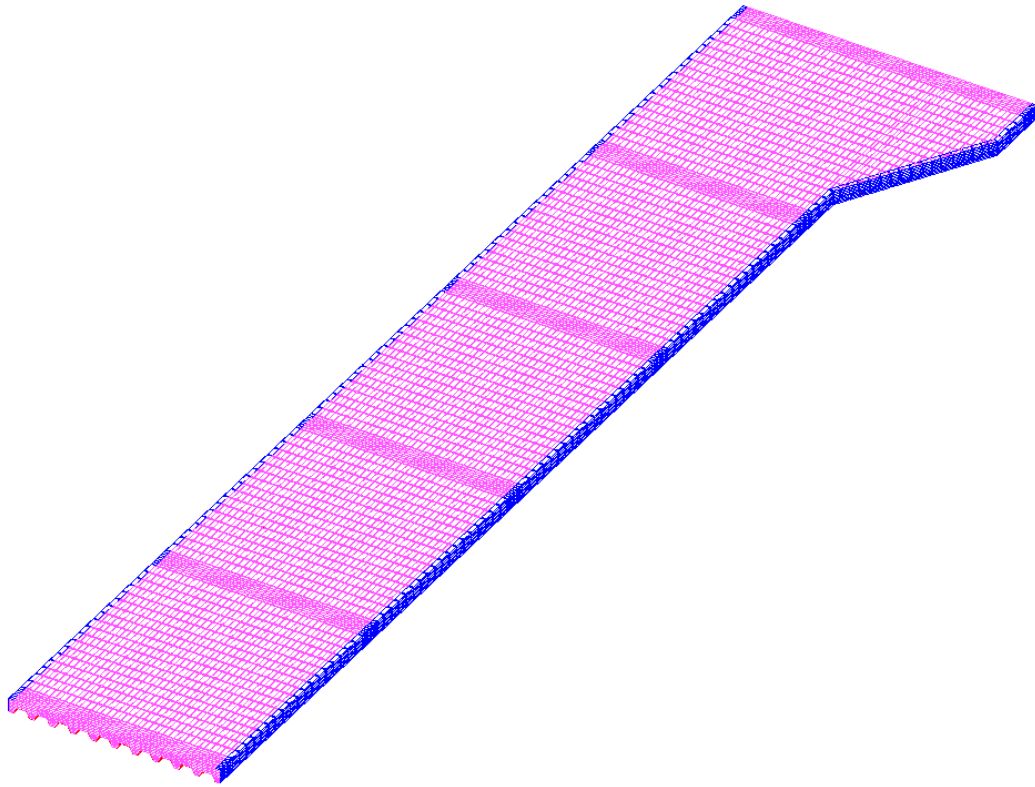


Fig. 62. Modelo de elementos finitos. Forjado colaborante, correas de cierre y hormigón. Tramo A

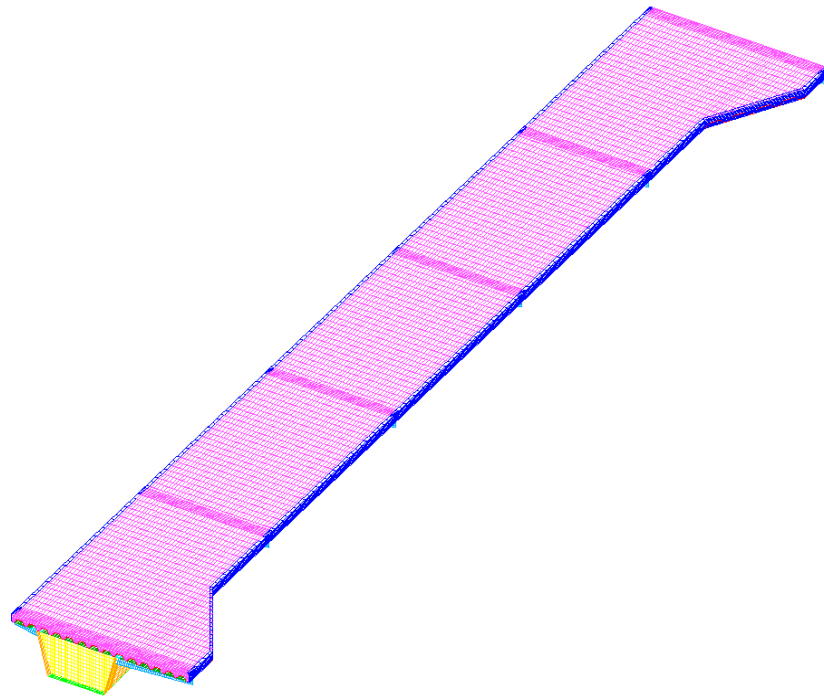


Fig. 63. Modelo de elementos finitos. Vista en sólido. Tramo B

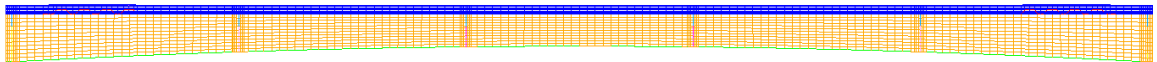


Fig. 64. Modelo de elementos finitos. Alzado. Tramo B

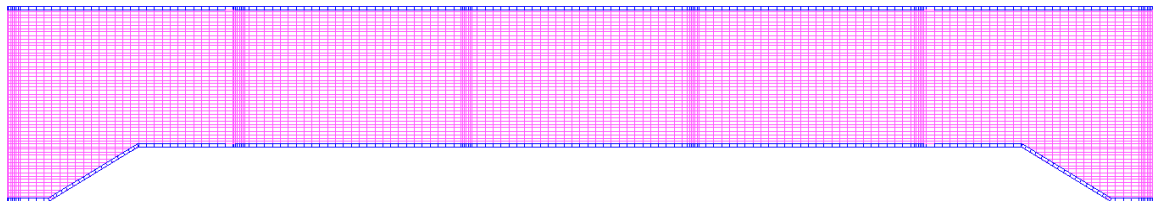


Fig. 65. Modelo de elementos finitos. Planta. Tramo B

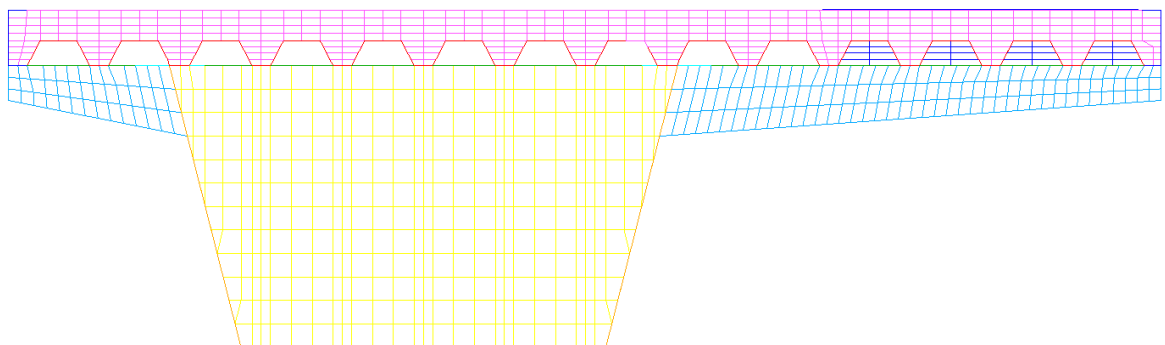


Fig. 66. Modelo de elementos finitos. Vista longitudinal. Tramo B

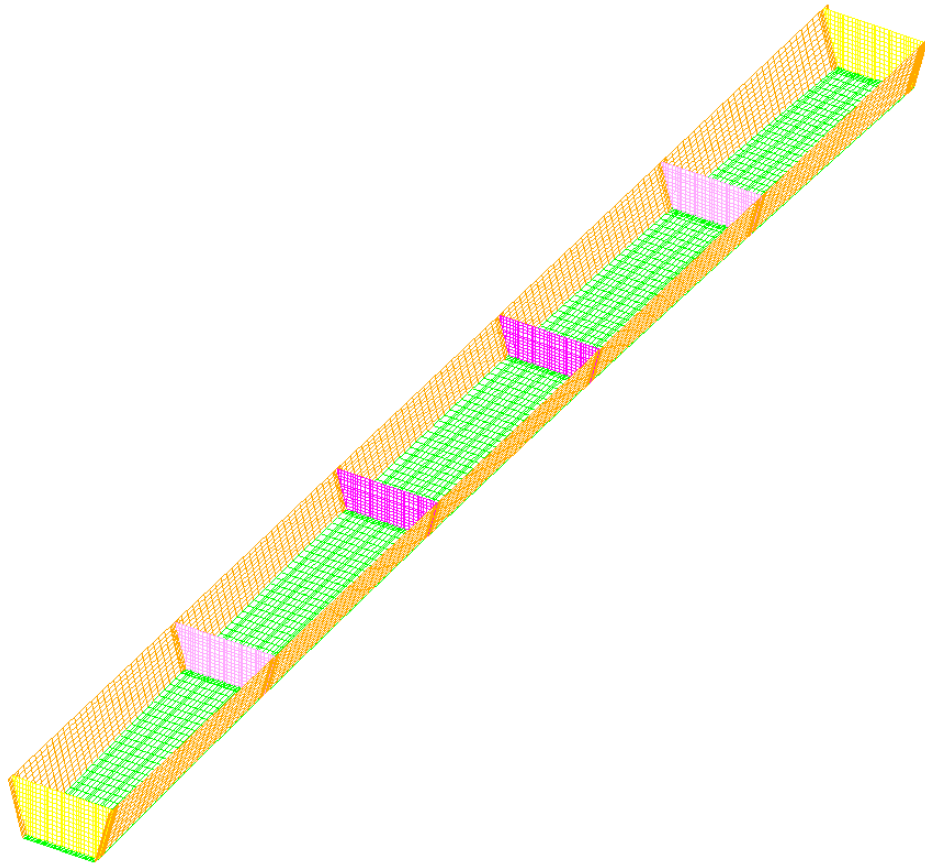


Fig. 67. Modelo de elementos finitos. Viga cajón y diafragmas. Tramo B

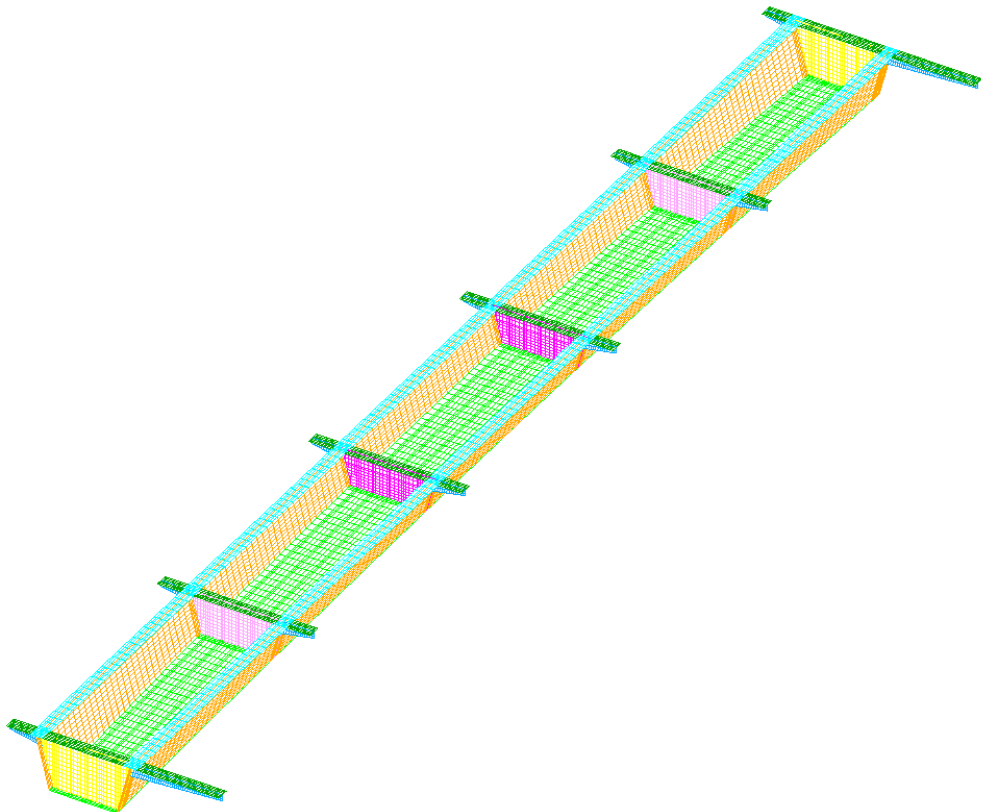


Fig. 68. Modelo de elementos finitos. Viga cajón, diafragmas y vuelos. Tramo B

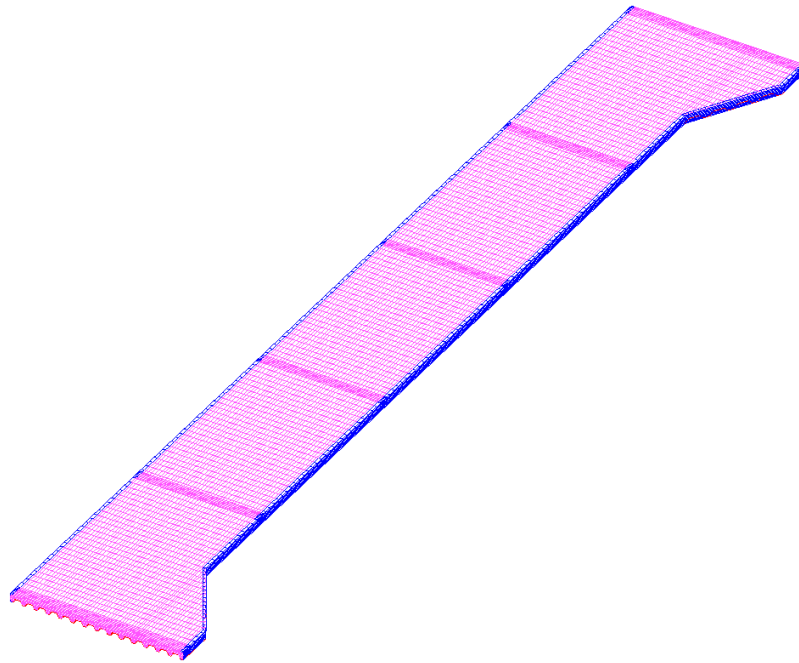


Fig. 69. Modelo de elementos finitos. Forjado colaborante, correas de cierre y hormigón. Tramo B

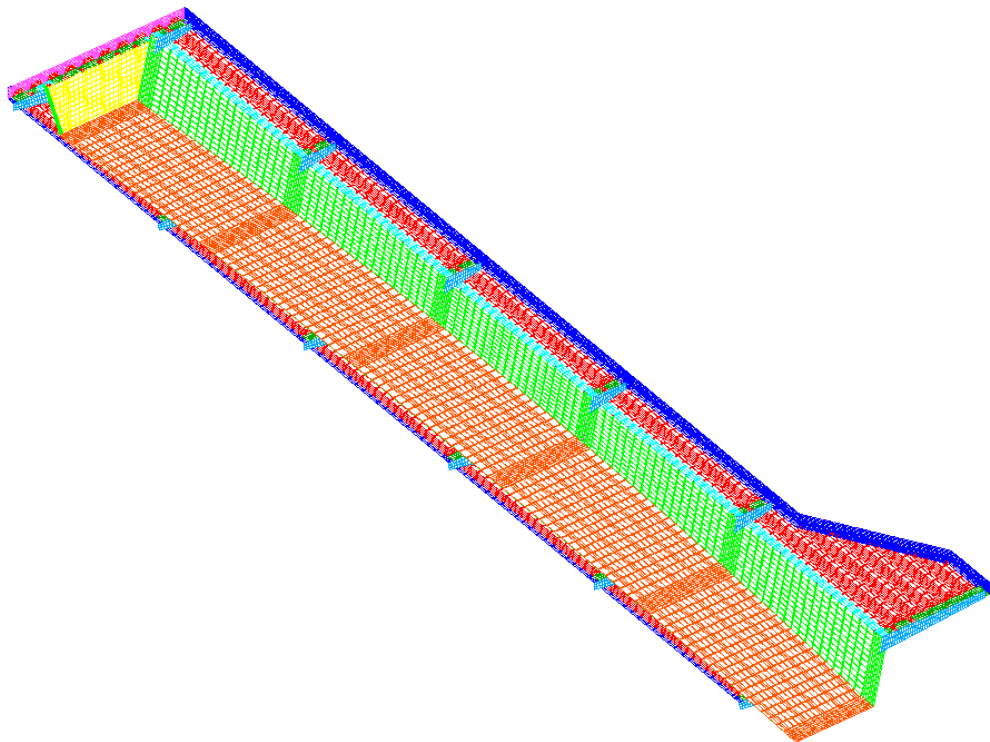


Fig. 70. Modelo de elementos finitos. Vista inferior. Zona de unión travesaño-forjado colaborante

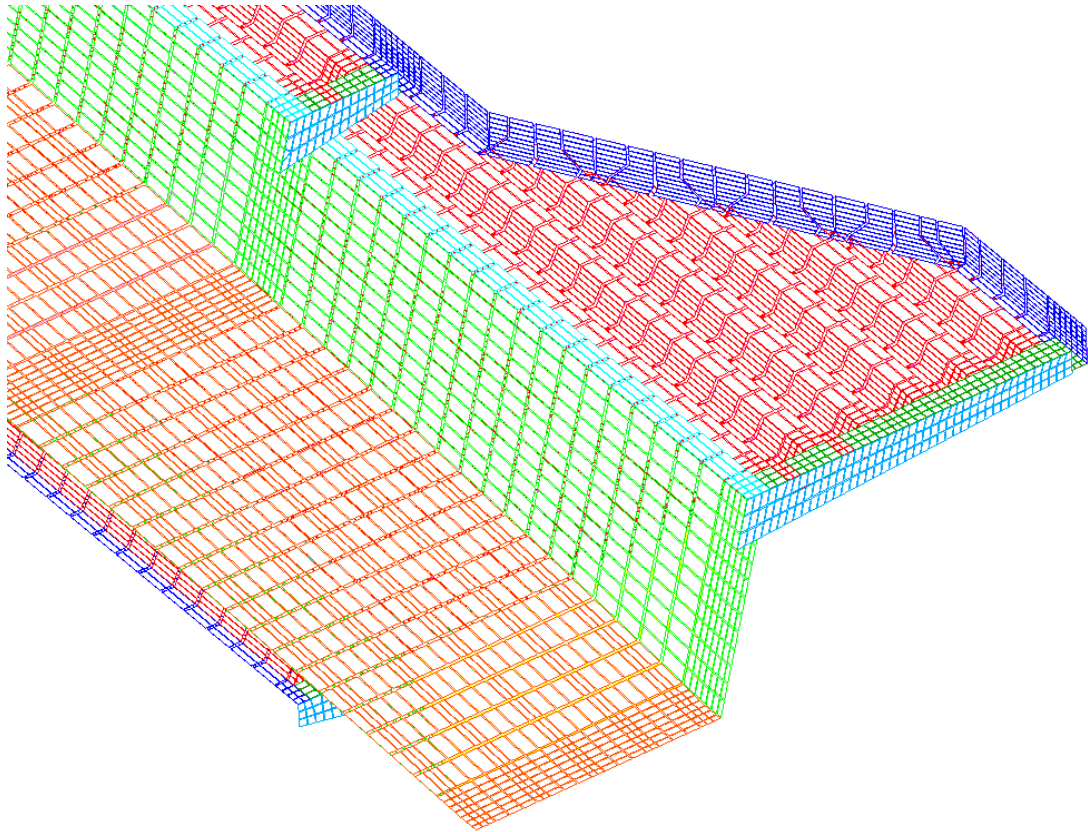


Fig. 71. Modelo de elementos finitos. Vista inferior. Zona de arranque forjado colaborante

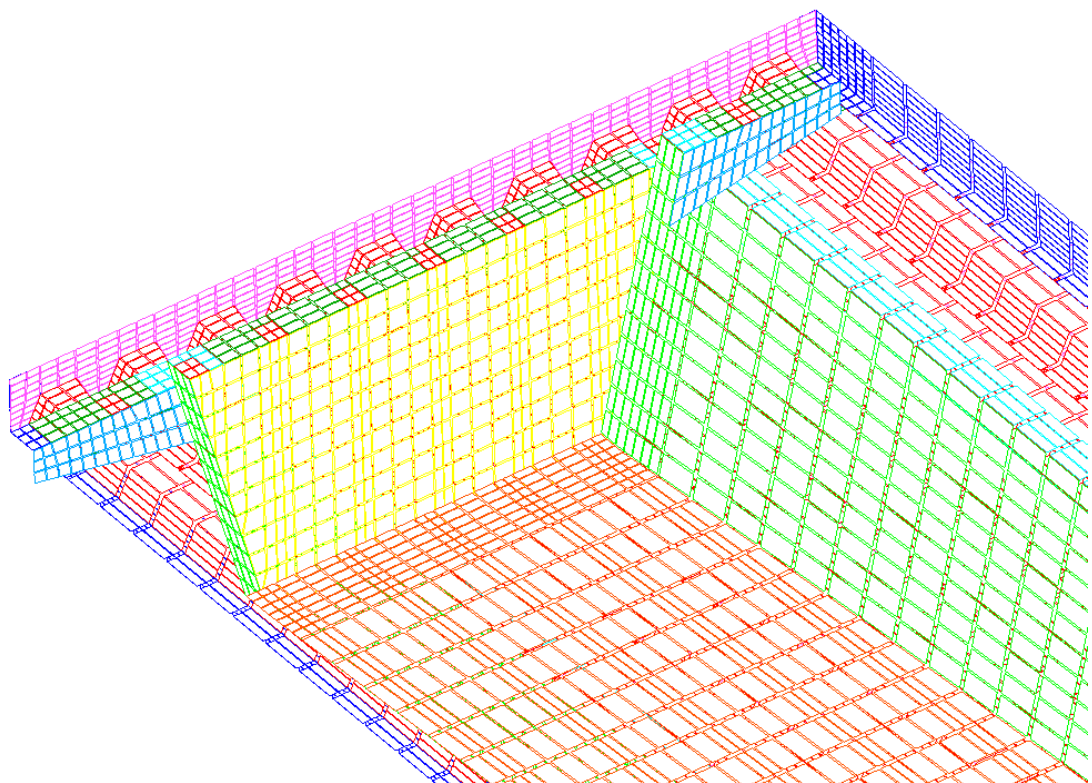


Fig. 72. Modelo de elementos finitos. Vista inferior. Viga cajón-forjado colaborante

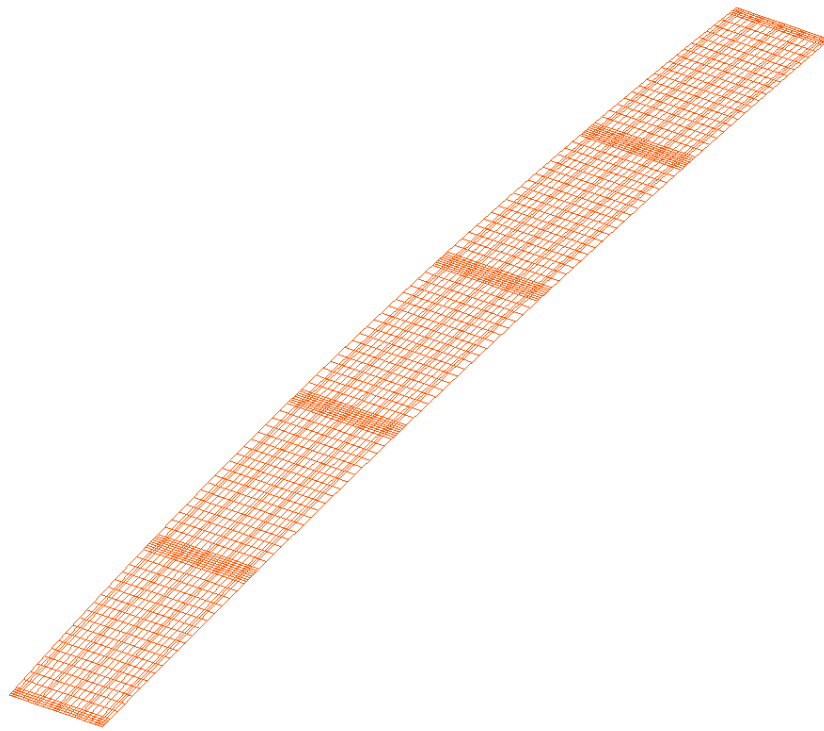


Fig. 73. Modelo de elementos finitos. Chapa base de 8 mm. Tramo A

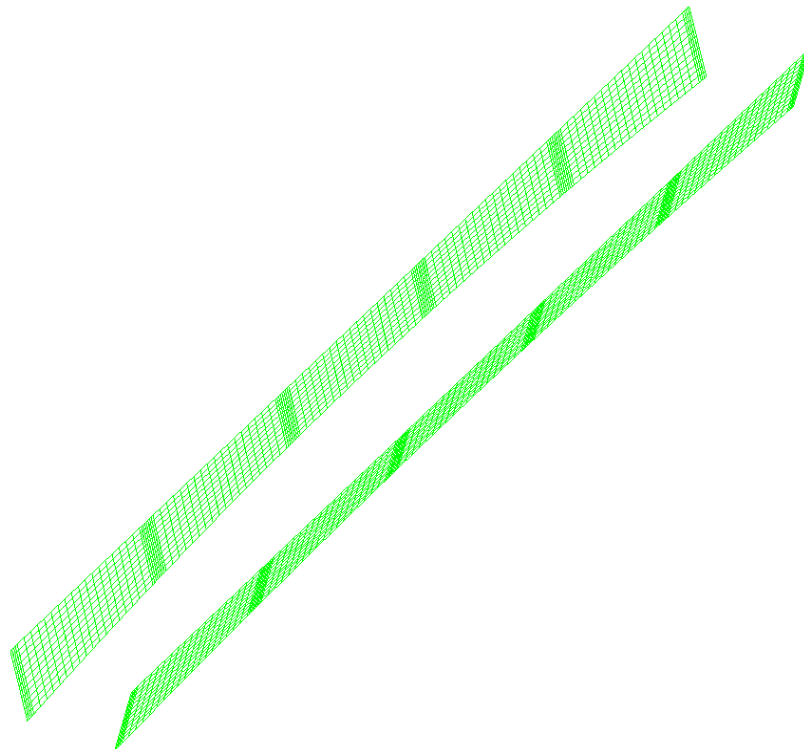


Fig. 74. Modelo de elementos finitos. Chapa lateral de 6 mm. Tramo A

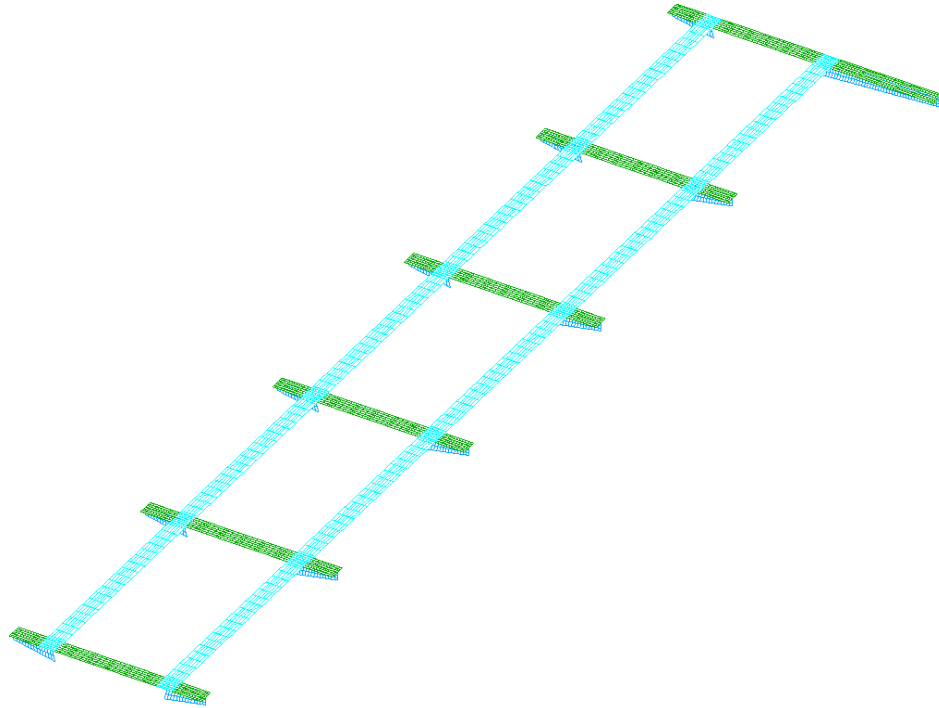


Fig. 75. Modelo de elementos finitos. Chapa de 10 mm. Tramo A

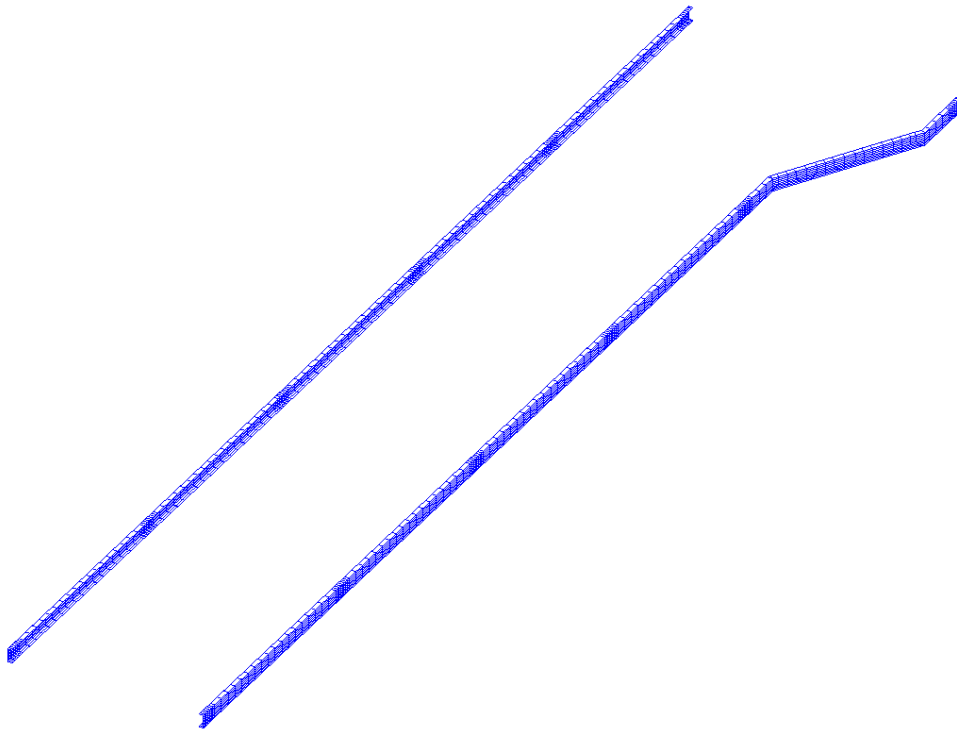


Fig. 76. Modelo de elementos finitos. Chapa de 2 mm. Tramo A

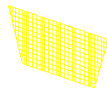
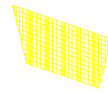


Fig. 77. Modelo de elementos finitos. Diafragma de 10 mm. Tramo A

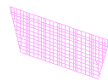
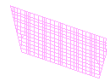


Fig. 78. Modelo de elementos finitos. Diafragma de 15 mm. Tramo A

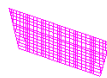
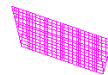


Fig. 79. Modelo de elementos finitos. Diafragma de 18 mm. Tramo A

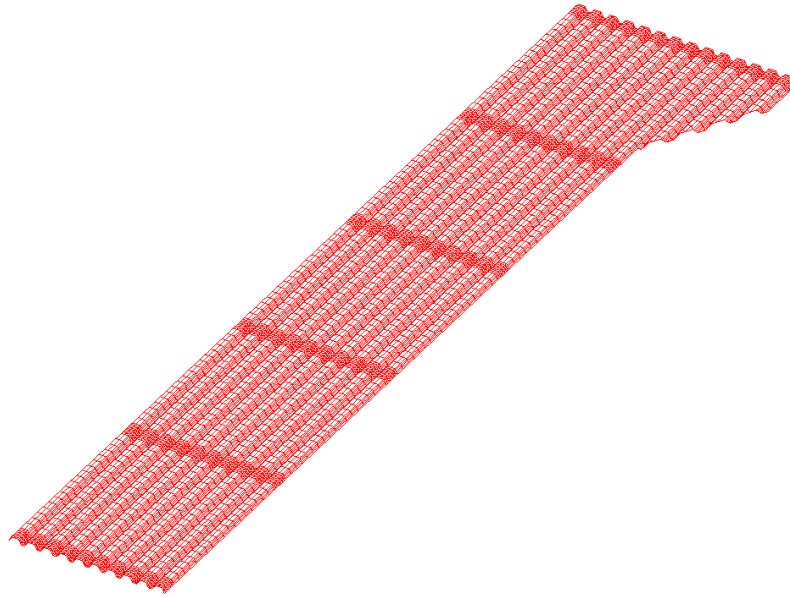


Fig. 80. Modelo de elementos finitos. Chapa colaborante. Tramo A

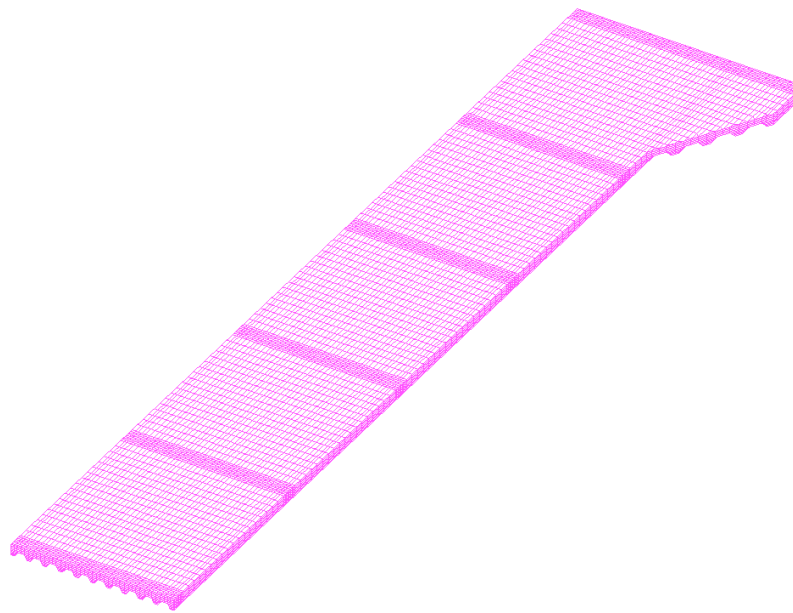


Fig. 81. Modelo de elementos finitos. Hormigón. Tramo A

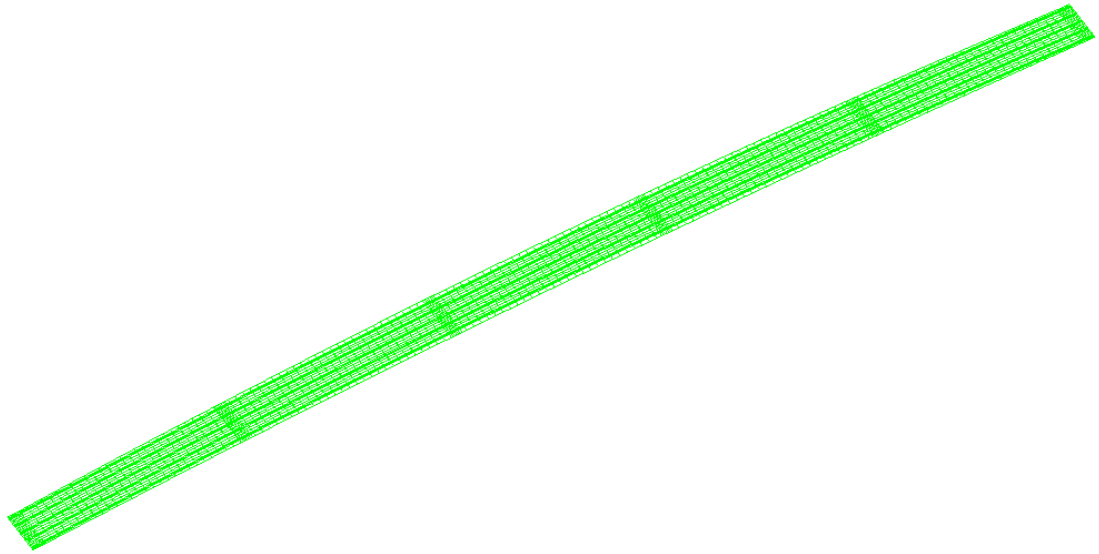


Fig. 82. Modelo de elementos finitos. Chapa base de 8 mm. Tramo B

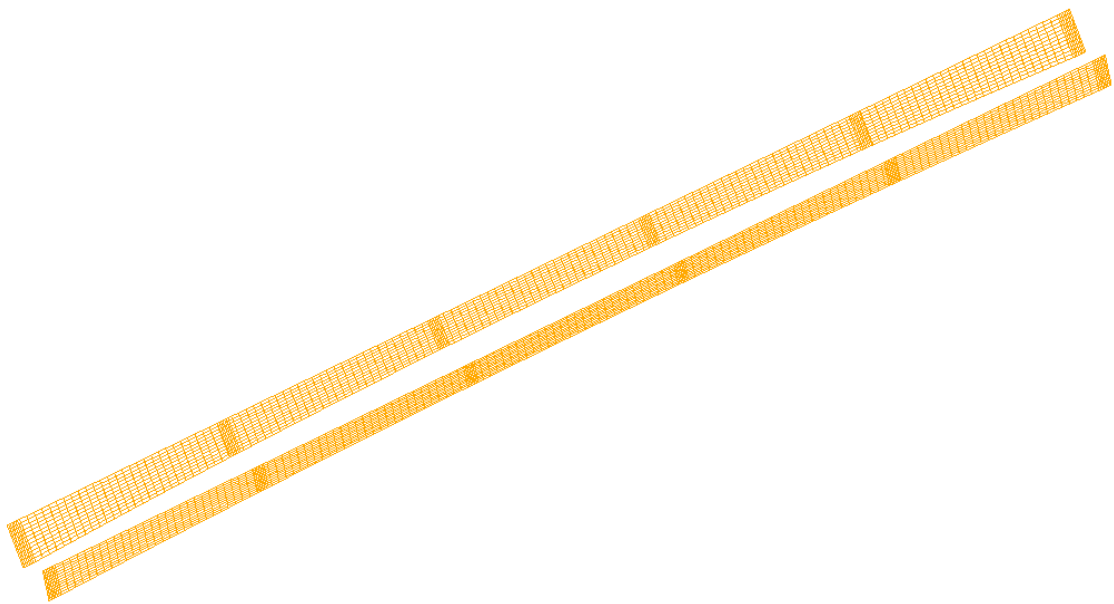


Fig. 83. Modelo de elementos finitos. Chapa lateral de 6 mm. Tramo B

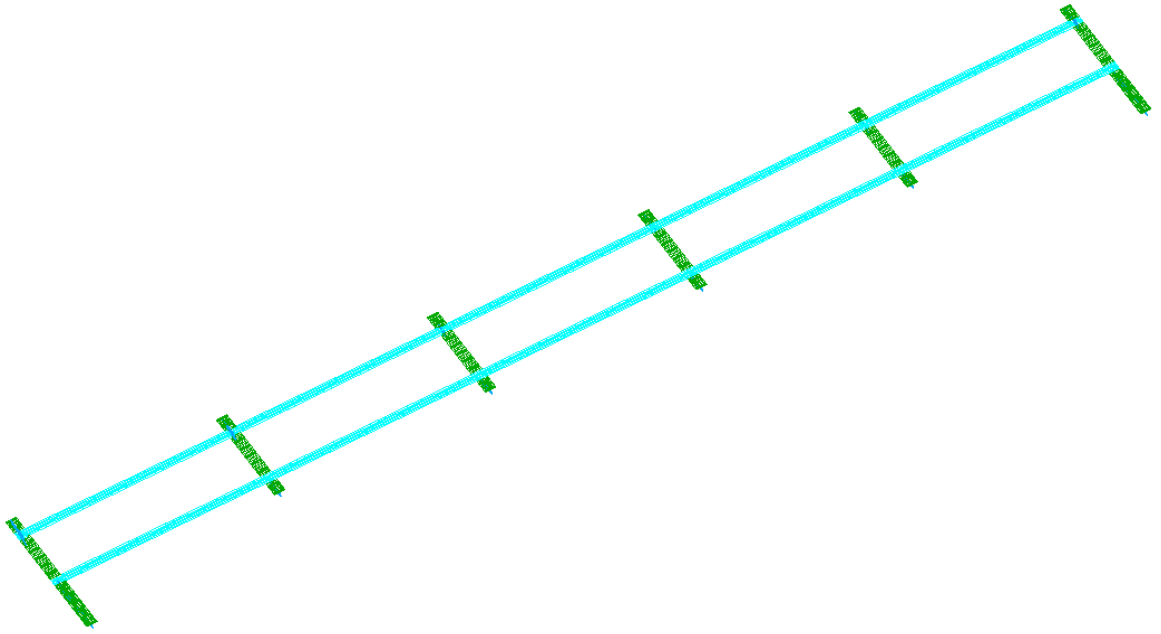


Fig. 84. Modelo de elementos finitos. Chapa de 10 mm. Tramo B

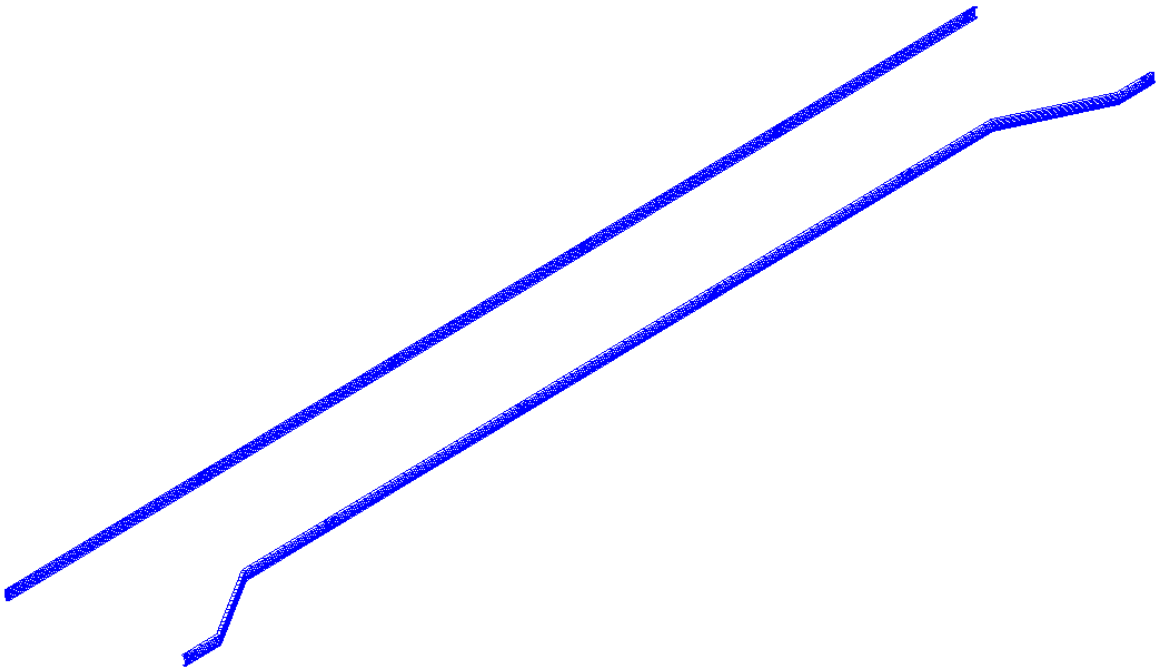


Fig. 85. Modelo de elementos finitos. Chapa de 2 mm. Tramo B



Fig. 86. Modelo de elementos finitos. Diafragma de 15 mm. Tramo B



Fig. 87. Modelo de elementos finitos. Diafragma de 20 mm. Tramo B



Fig. 88. Modelo de elementos finitos. Diafragma de 22 mm. Tramo B

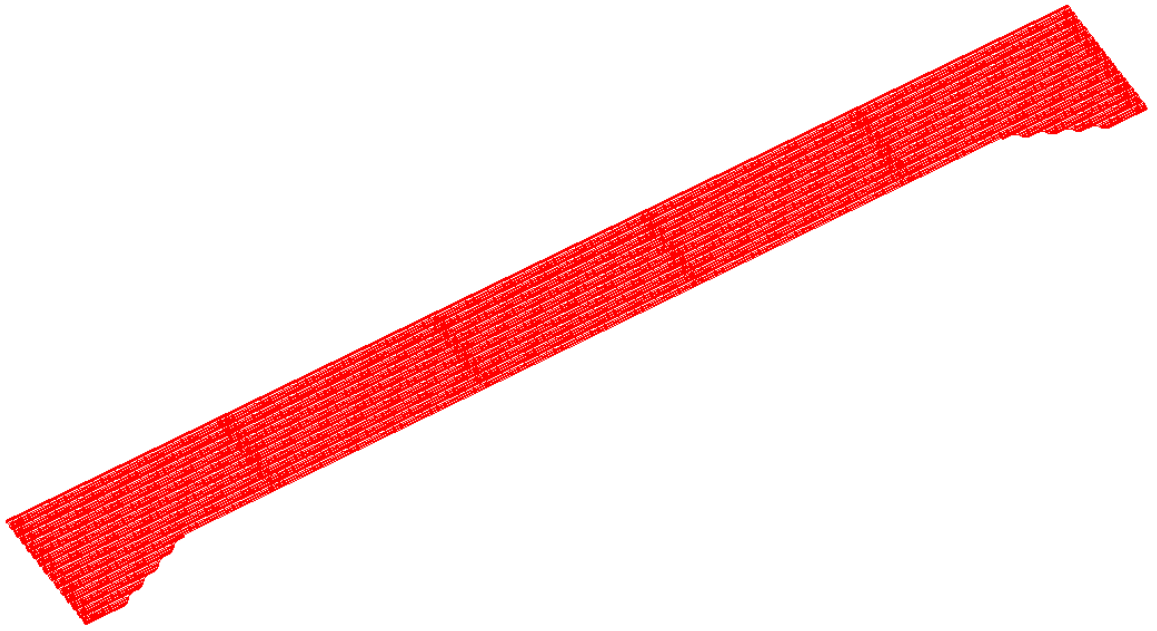


Fig. 89. Modelo de elementos finitos. Chapa colaborante. Tramo B

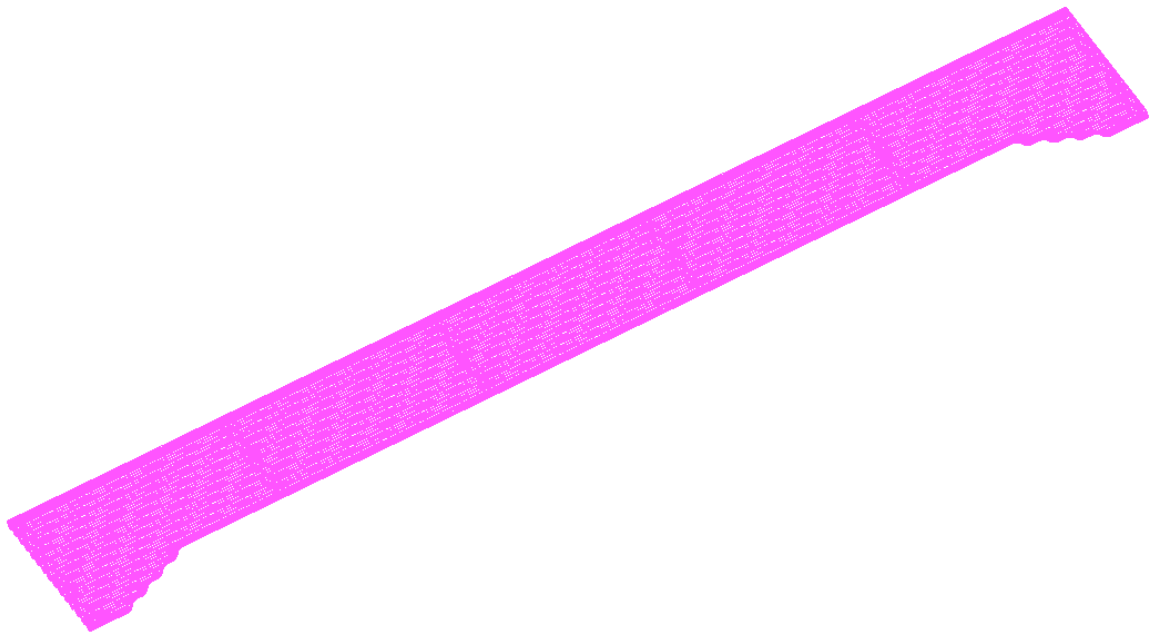


Fig. 90. Modelo de elementos finitos. Hormigón. Tramo B

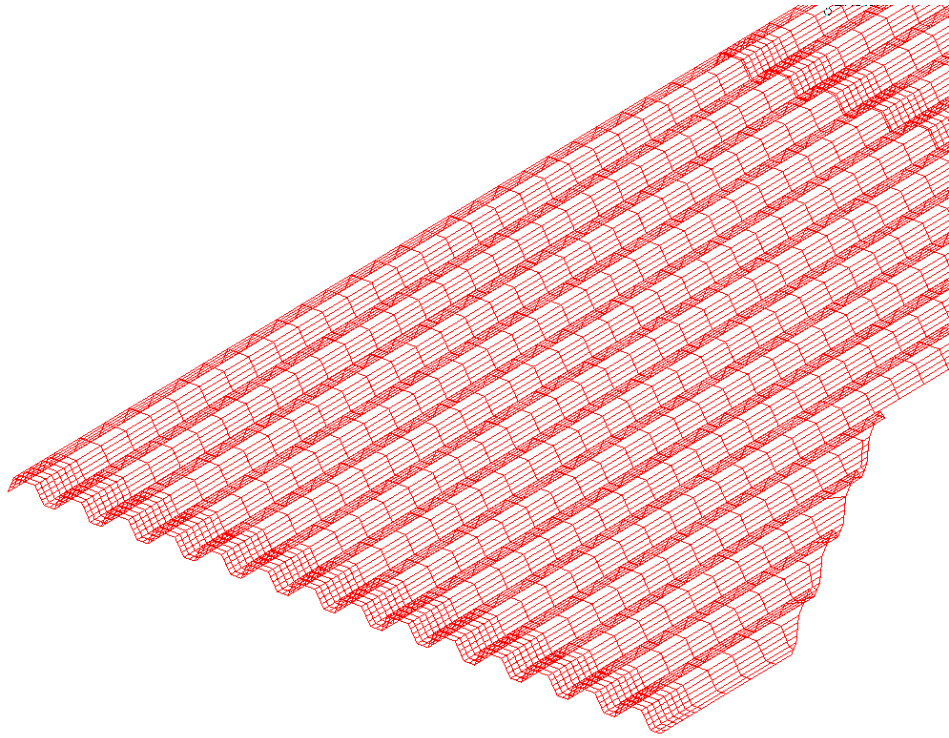


Fig. 91. Modelo de elementos finitos. Detalle de la chapa colaborante

3.2. Condiciones de apoyo y cargas

En cuanto a las condiciones de apoyo, tanto para el tramo A como para el B, se han inmovilizado completamente los elementos tipo SHELL correspondientes a uno de los apoyos (Fig. 93 y Fig 96), mientras que en el lado opuesto se han permitido los desplazamientos en dirección longitudinal (Fig 94 y Fig 97), para modelizar el efecto de deformación angular en los neoprenos, que permite un desplazamiento longitudinal prácticamente libre.

Los giros se han considerado libres en ambos extremos, debido a que cada tramo apoya en un neopreno.

En las Figs. 92 a 97 se muestran las condiciones de apoyo tal como se han introducido en el modelo, en ambos tramos (A y B).

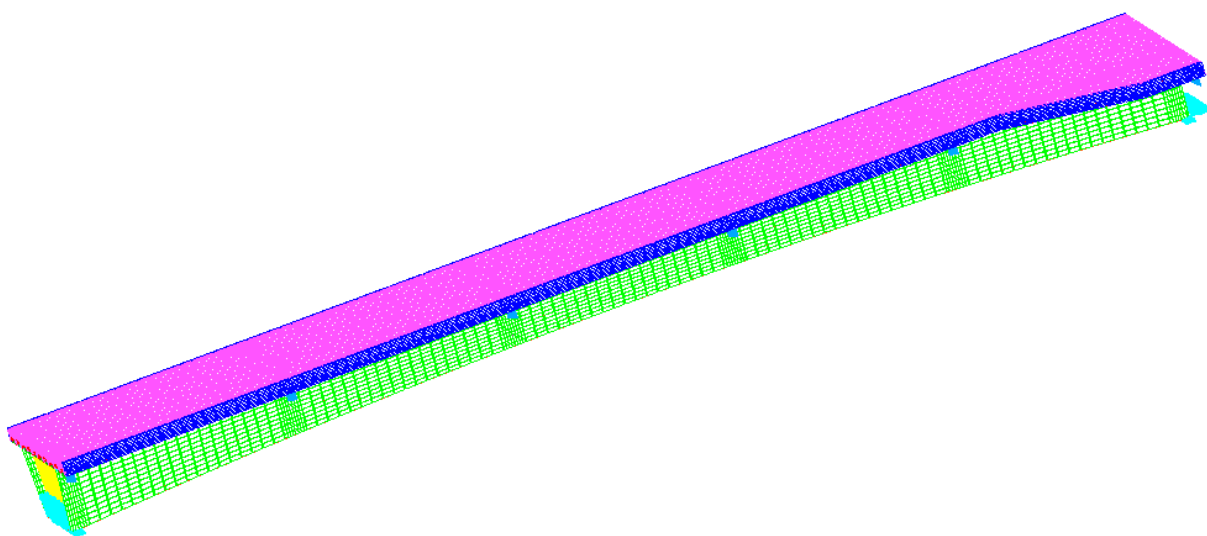


Fig. 92. Condiciones de apoyo. Tramo A

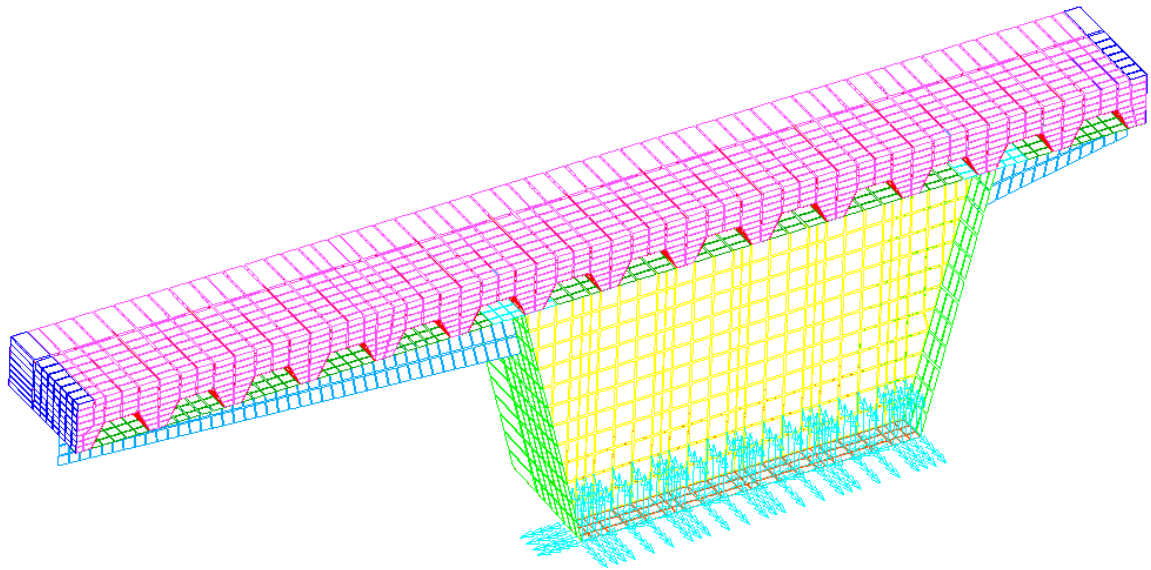


Fig. 93. Condiciones de apoyo en la base. Tramo A

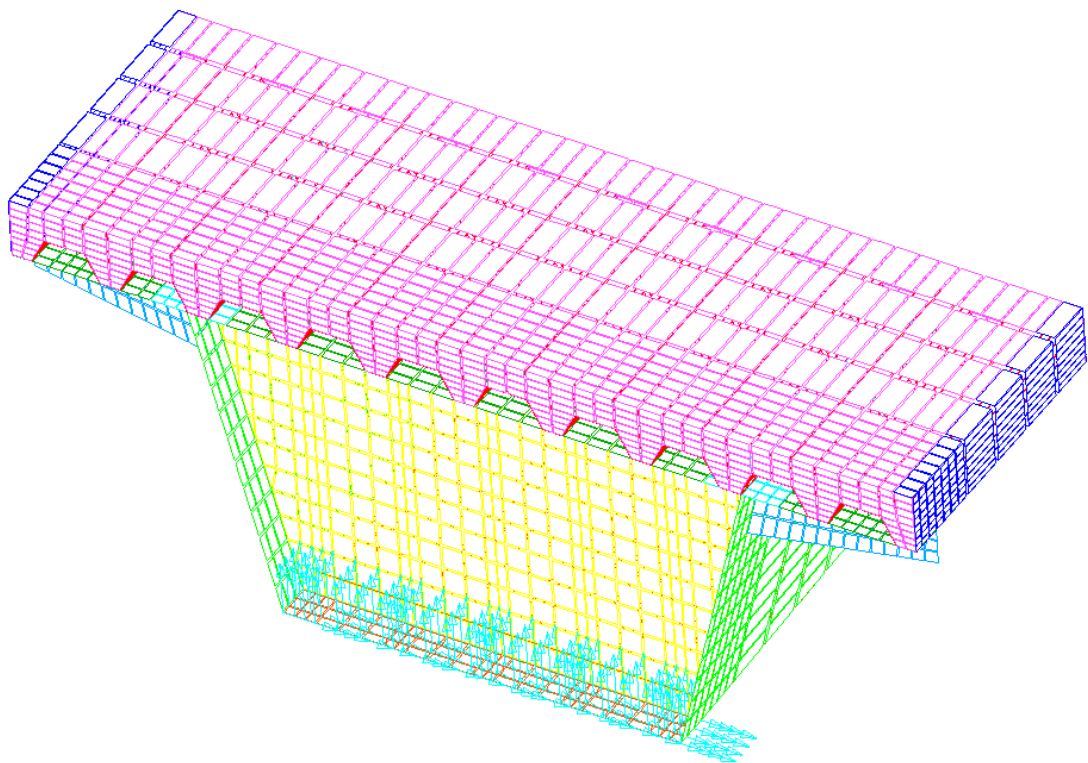


Fig. 94. Desplazamientos libres en dirección longitudinal. Tramo A

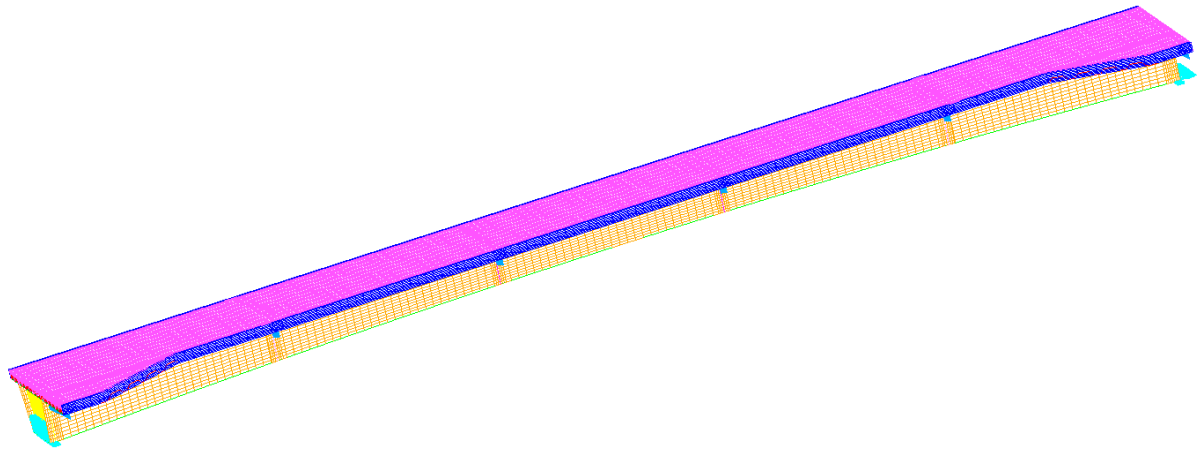


Fig. 95. Condiciones de apoyo. Tramo B

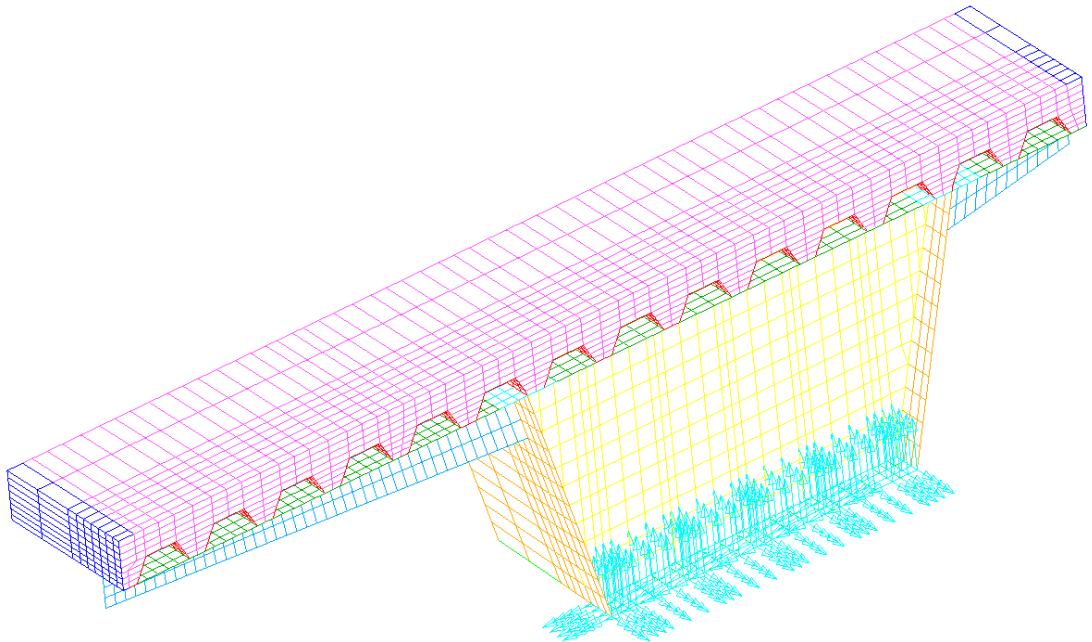


Fig. 96. Condiciones de apoyo en la base. Tramo B

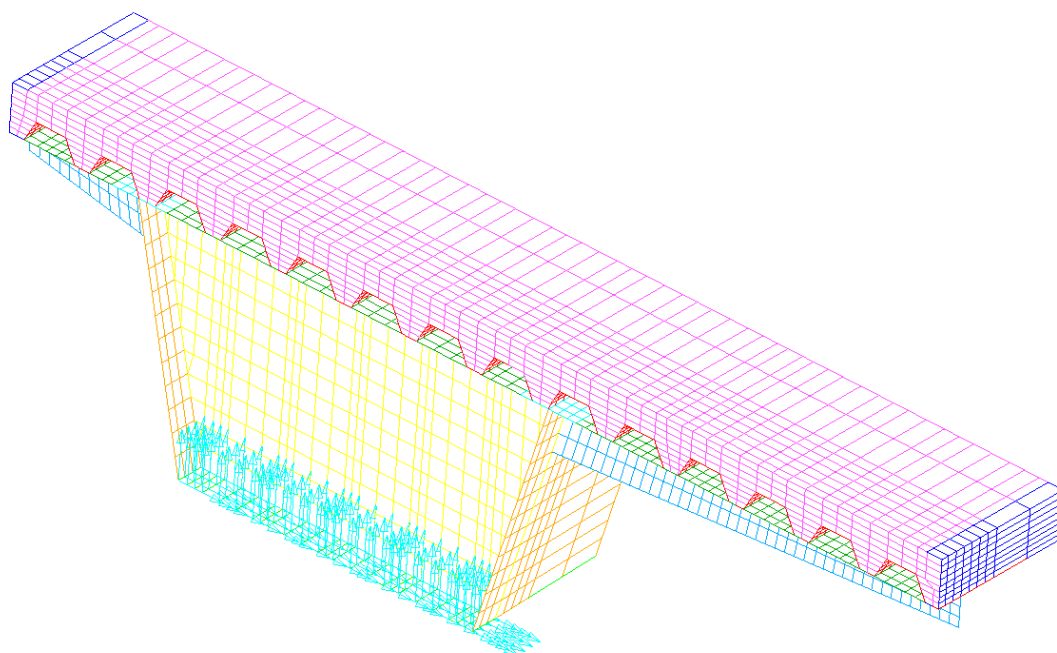


Fig. 97. Desplazamientos libres en dirección longitudinal. Tramo B

Por lo que respecta a las cargas, se han considerado los tres casos individuales siguientes:

- Peso propio de la estructura metálica: se evalúa automáticamente a partir de la densidad del acero.
- Peso propio del forjado colaborante: se evalúa automáticamente a partir de la densidad del hormigón y de la chapa colaborante.
- Sobrecarga de uso: 4.0 kN/m^2 , según especificaciones de la norma IAP.

La sobrecarga de uso se introduce en el modelo como carga distribuida en la cara superior del forjado.

En las Figs. 98 a 99 se muestran las cargas tal como se han introducido en el modelo.

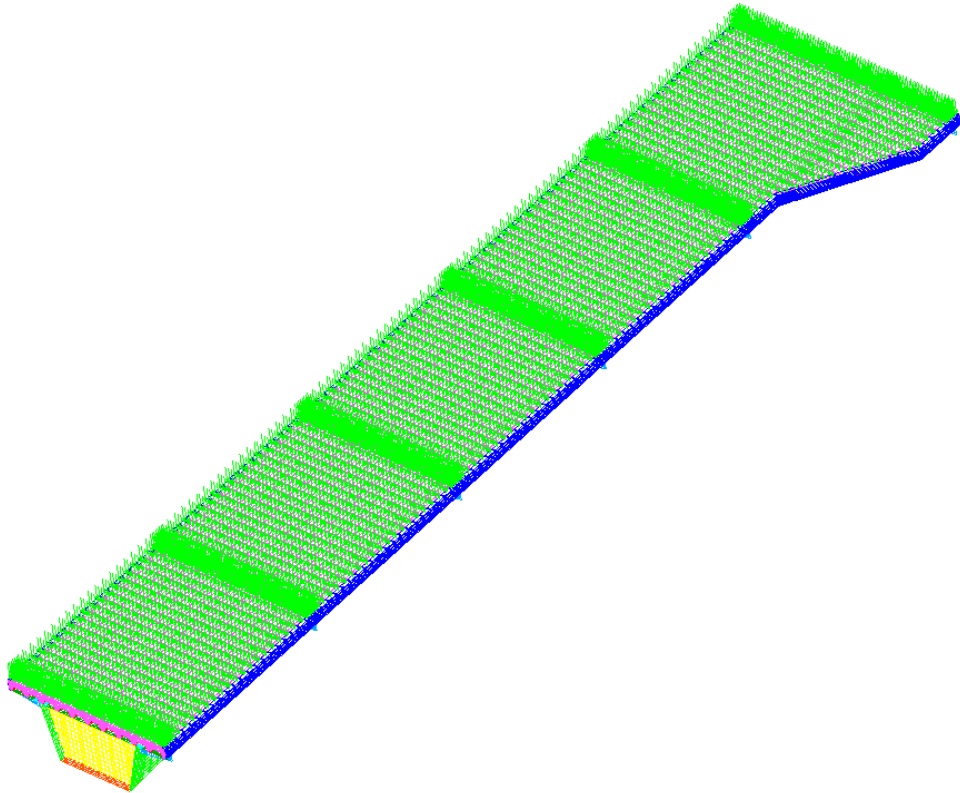


Fig. 98. Sobrecarga total. Tramo A

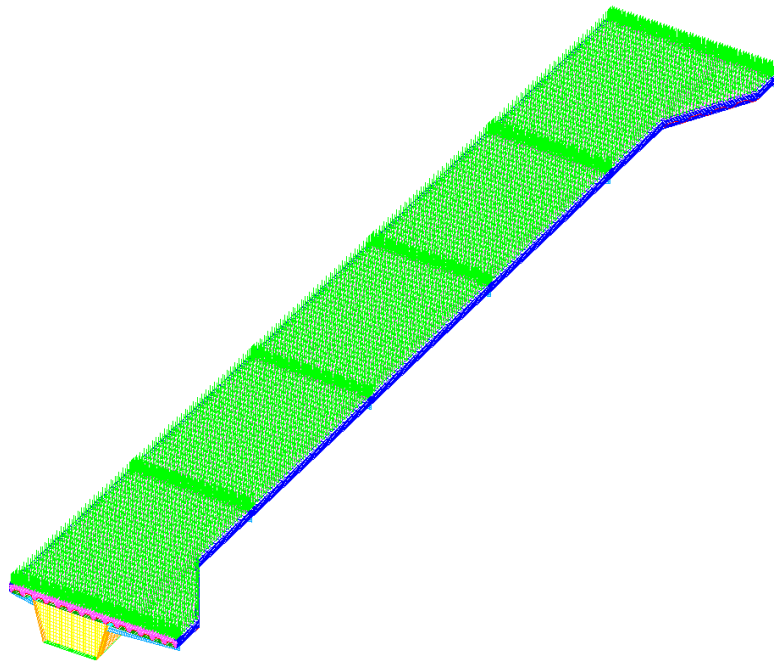


Fig. 99. Sobrecarga total. Tramo B

A partir de estas cargas individuales, se establecen las siguientes hipótesis de carga, para las comprobaciones de estados límites de servicio y últimos, respectivamente (Tabla XX).

Tabla XX. Hipótesis de carga

Hipótesis		Carga	
		Peso Propio	Sobrecarga
SERVICIO	ELS-I	1.0	
	ELS-II	1.0	1.0
ÚLTIMOS	ELU-I	1.35	
	ELU-II	1.35	1.5

Se realiza, por otra parte, un cálculo de dilatación térmica, para un incremento máximo de temperatura de 40° C, de cara a verificar el movimiento en los apoyos y las tensiones adicionales generadas.

Como análisis complementario al estático, se realiza un cálculo de estabilidad en la hipótesis de plena carga (ELU-II), para comprobar tanto la estabilidad global, como los posibles problemas de estabilidad local.

Por último, se efectúa un análisis de vibraciones, de cara a evaluar la posible entrada en resonancia en la carga de tránsito.

El desarrollo del modelo y los diferentes análisis se han llevado a cabo mediante el programa de elementos finitos I-Deas NX Series (Siemens) [7].

4. RESULTADOS Y COMPROBACIONES

A continuación se presentan los resultados obtenidos para los diferentes análisis realizados. Se presentan, en primer lugar, los correspondientes al cálculo estático; a continuación, los correspondientes al cálculo de dilatación; y finalmente, los correspondientes al análisis de estabilidad y vibraciones.

4.1. Cálculo estático

Se presentan los resultados para las diferentes hipótesis de carga contempladas en el cálculo. Se incluye para cada hipótesis la deformada (amplificada por un factor de 50), y al final se incluye una tabla resumen de los desplazamientos y de las tensiones de von Mises máximas en cada uno de los elementos, y para ambos tramos de la pasarela.

Hipótesis ELS-I

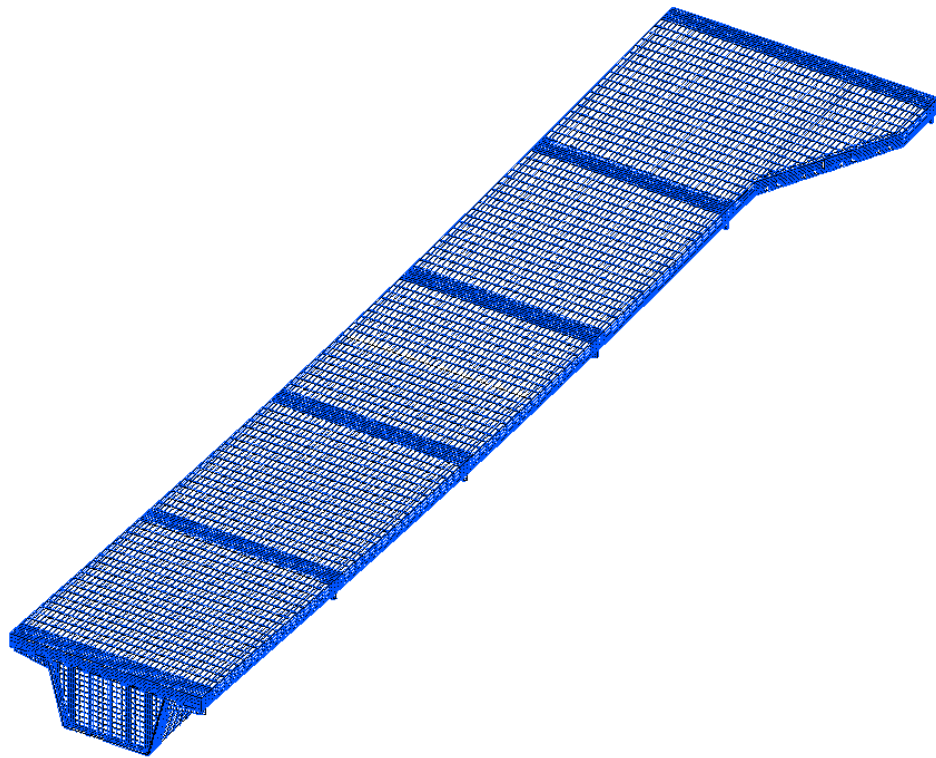


Fig. 100. Deformada. Perspectiva. Tramo A

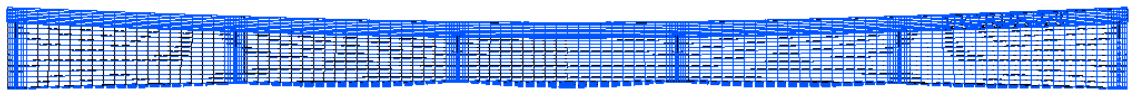


Fig. 101. Deformada. Alzado. Tramo A

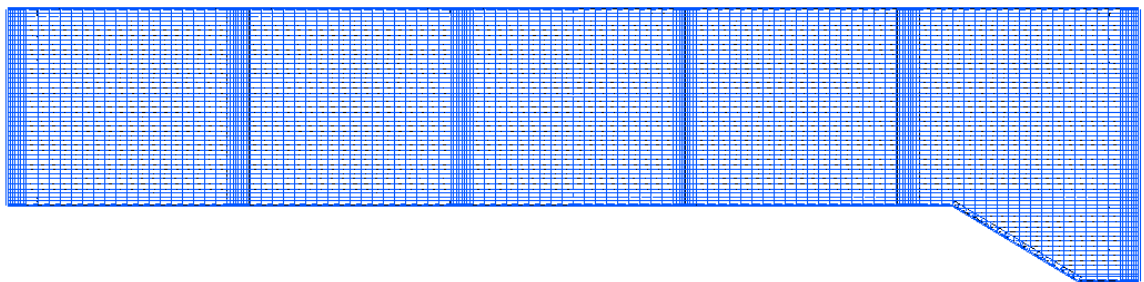


Fig. 102. Deformada. Planta. Tramo A

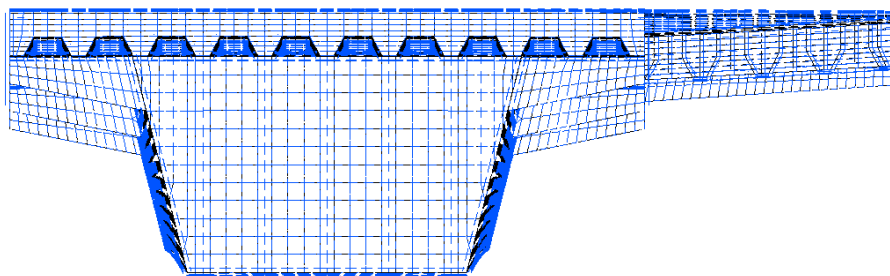


Fig. 103. Deformada. Perfil. Tramo A

Hipótesis ELS-I

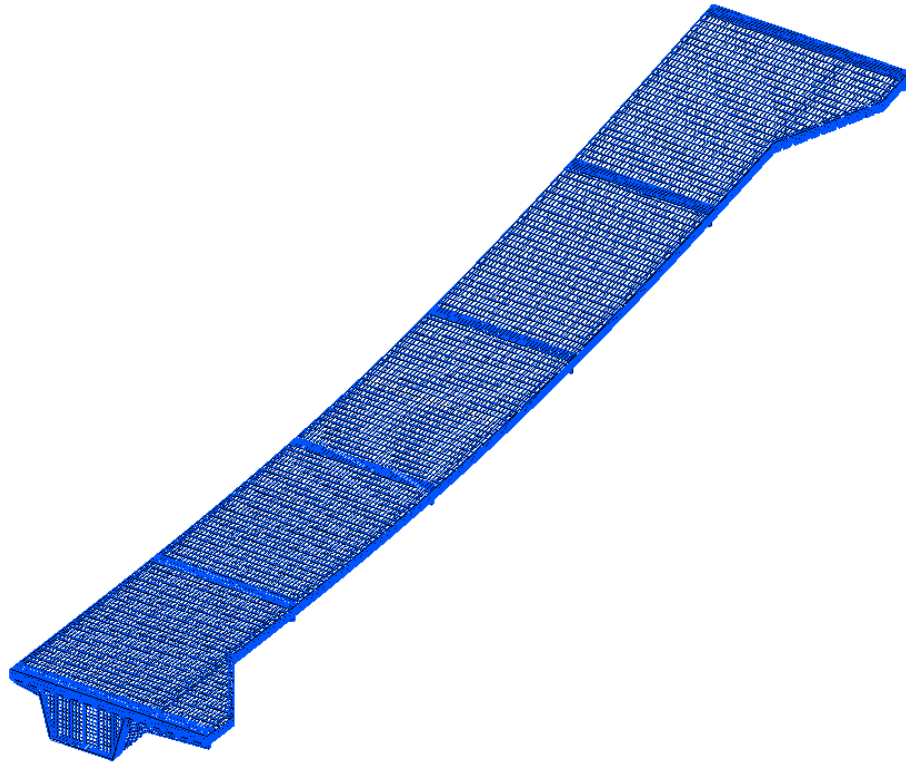


Fig. 104. Deformada. Perspectiva. Tramo B

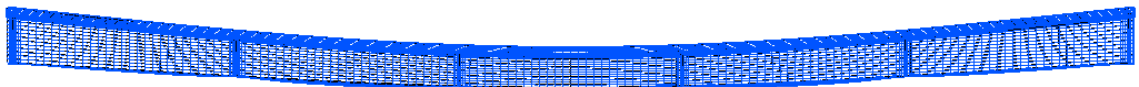


Fig. 105. Deformada. Alzado. Tramo B

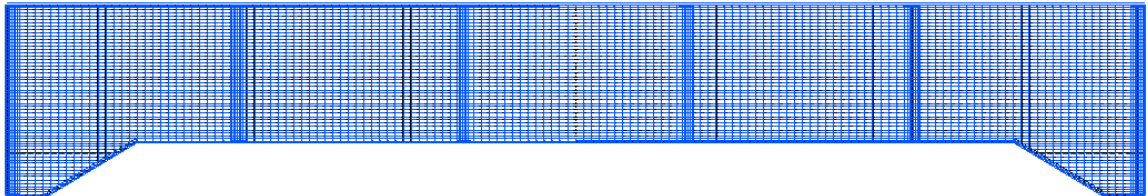


Fig. 106. Deformada. Planta. Tramo B

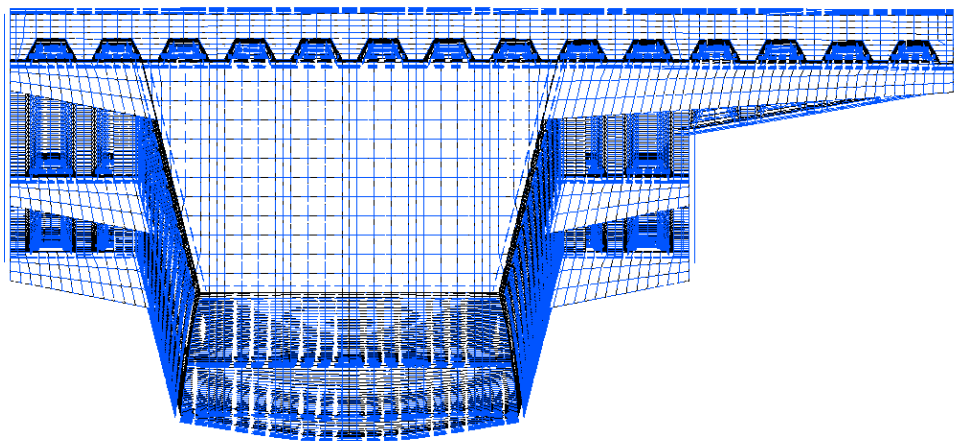


Fig. 107. Deformada. Perfil. Tramo B

Hipótesis ELS-II

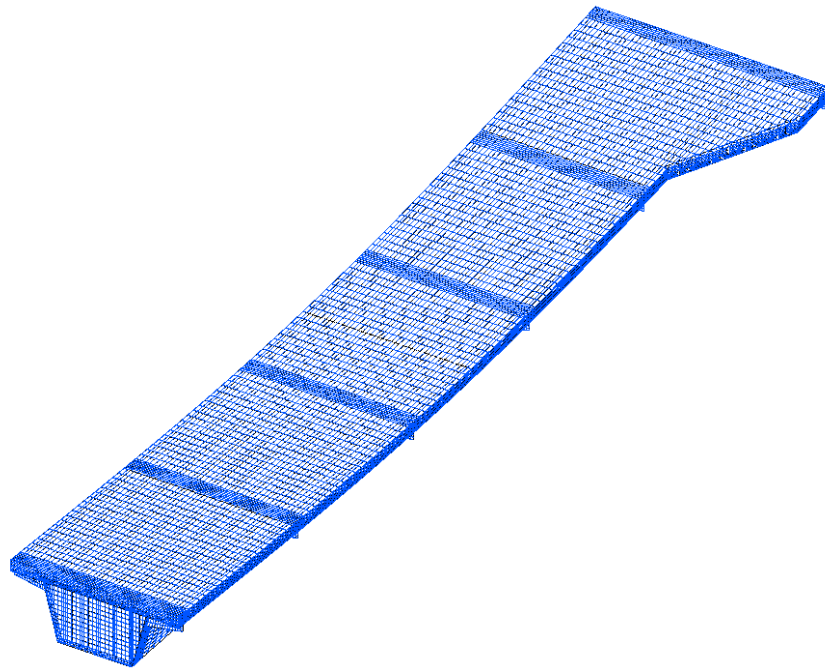


Fig. 108. Deformada. Perspectiva. Tramo A

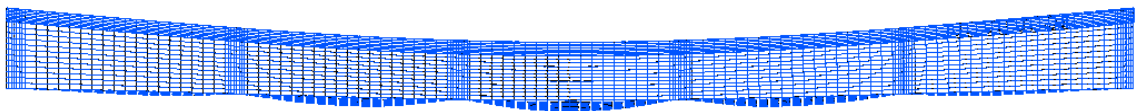


Fig. 109. Deformada. Alzado. Tramo A

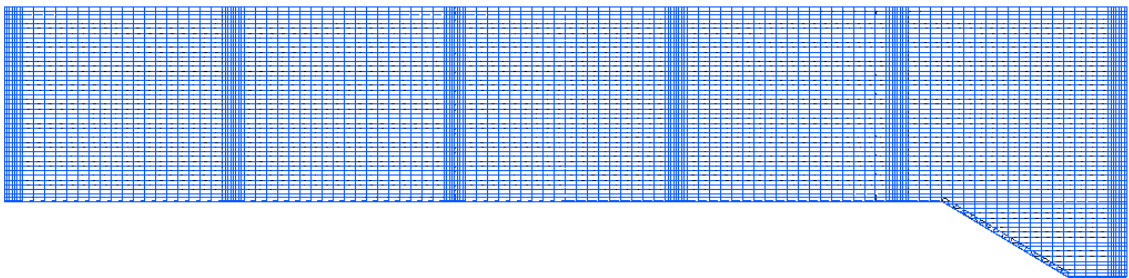


Fig. 110. Deformada. Planta. Tramo A

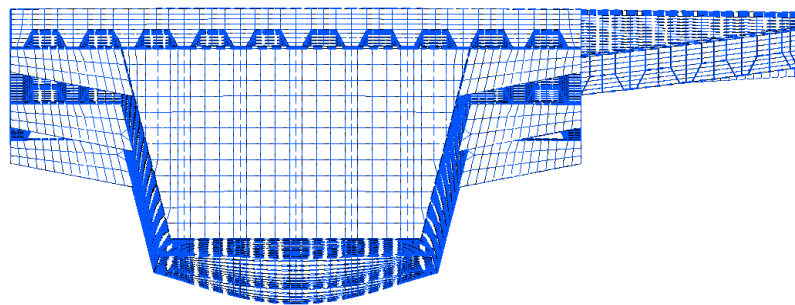


Fig. 111. Deformada. Perfil. Tramo A

Hipótesis ELS-II

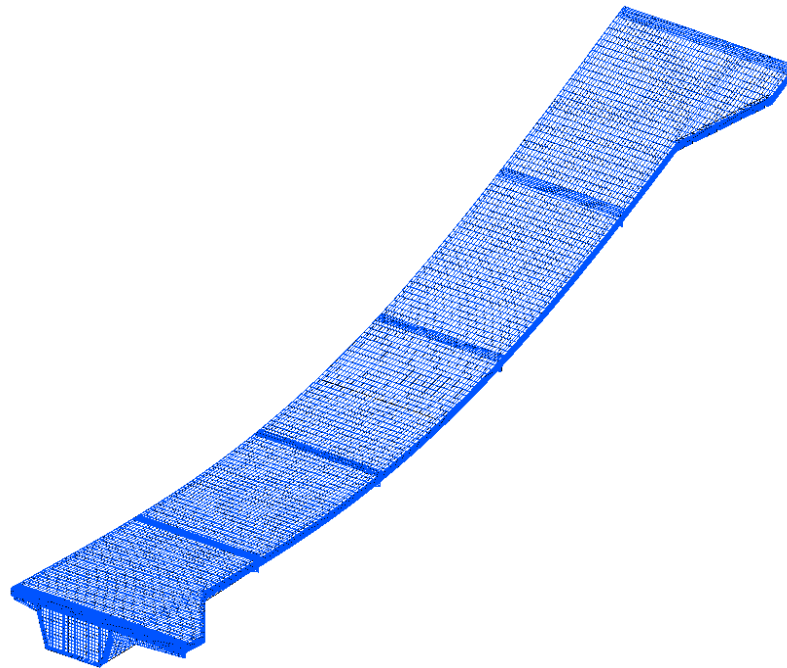


Fig. 112. Deformada. Perspectiva. Tramo B



Fig. 113. Deformada. Alzado. Tramo B

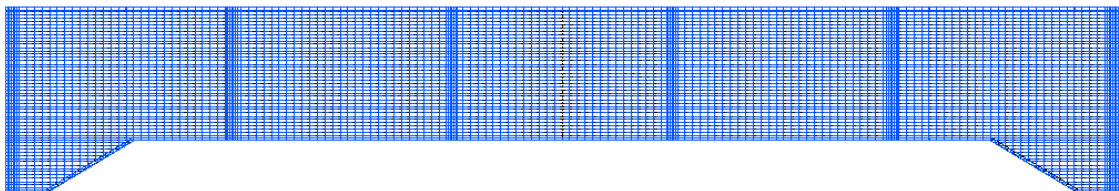


Fig. 114. Deformada. Planta. Tramo B

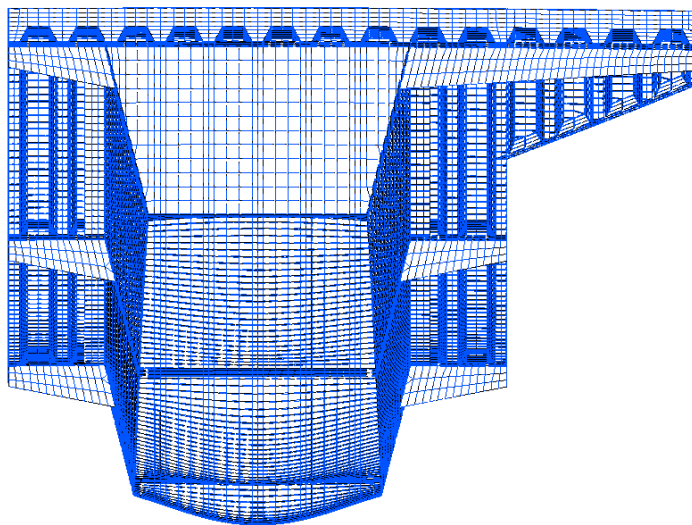


Fig. 115. Deformada. Perfil. Tramo B

En las Tablas XXI y XXIV se muestran los resultados de desplazamientos para cada hipótesis, junto con su relación a la luz libre de la pasarela.

Tabla XXI. Desplazamientos verticales máximos (mm). Tramo A

Hipótesis	I	II
Vertical (δ_v)	-3.70	- 8.12
L/δ_v	2820	1285

Tabla XXII. Desplazamiento vertical máximo activo (mm). Tramo A

Hipótesis	Sobrecarga
Vertical (δ_v)	- 4.42
L/δ_v	2360

Tabla XXIII. Desplazamientos verticales máximos (mm). Tramo B

Hipótesis	I	II
Vertical (δ_v)	- 11.6	-26.4
L/δ_v	1290	567

Tabla XXIV. Desplazamiento vertical máximo activo (mm). Tramo B

Hipótesis	Sobrecarga
Vertical (δ_v)	- 14.8
L/δ_v	1011

Como se observa en las tablas anteriores, en ningún caso los desplazamientos verticales máximos superan el valor de $L/750$ a carga permanente y $L/500$ a sobrecarga.

En cuanto a los valores de flecha vertical máxima activa, debida sólo a sobrecarga, en el tramo A, se alcanza un valor de 4.42 mm, lo que corresponde a $1/2360$, muy por debajo del valor $1/1200$ recomendado por la norma EAE.

Sin embargo en el tramo B, se obtiene un valor de 14.8, lo que corresponde a $1/1011$, superando el valor de flecha admisible debida a la actuación del valor de sobrecarga.

Dado que el valor obtenido supera el límite de $1/1200$ será necesario hacer un cálculo de vibraciones, para justificar la validez del diseño adoptado frente a fenómenos de resonancia.

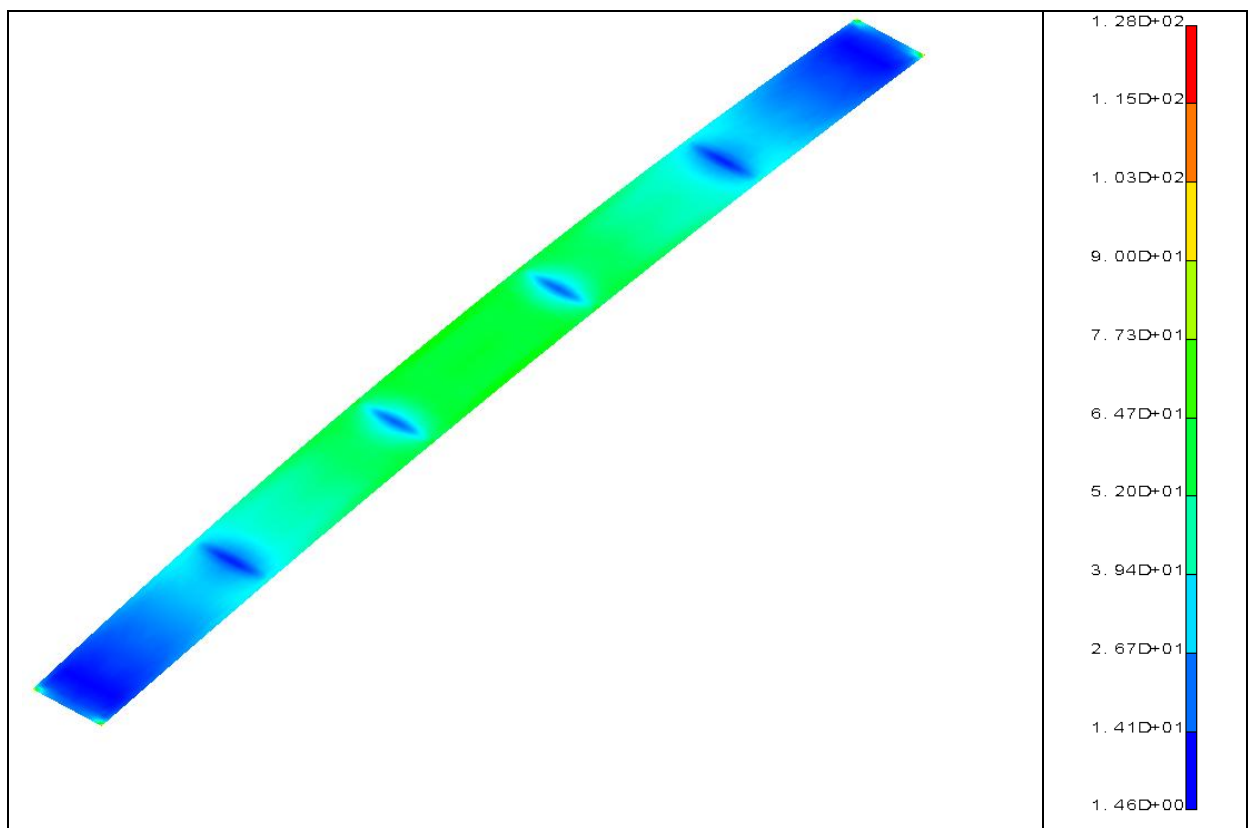
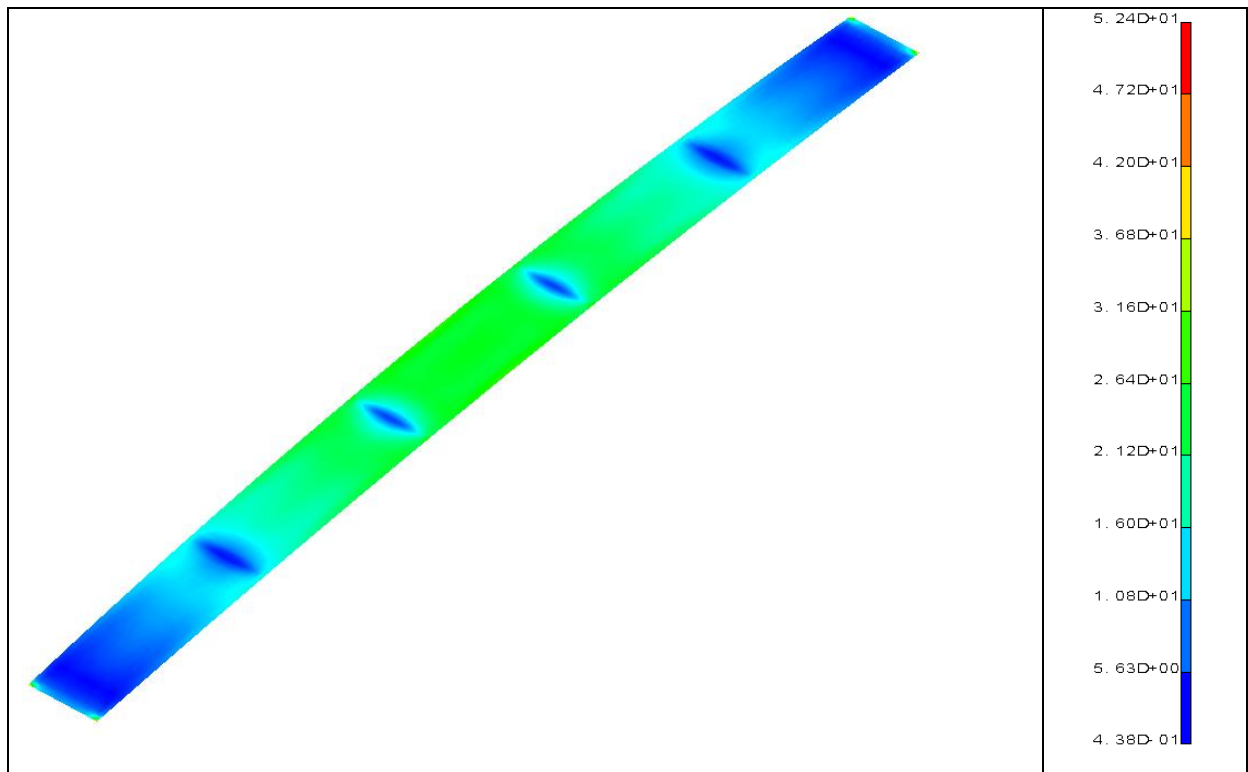
En la Tabla XXV se muestran los resultados de tensiones de von Mises máximas mayoradas en cada elemento de la pasarela para cada hipótesis, para el tramo A y B.

Como se observa en la tabla anterior, en ningún caso las tensiones superan el límite elástico de cálculo del acero utilizado ($S-275$, $275/1.05 = 261.9$ MPa).

En las Figs. 116 a 127 se muestran las distribuciones tensionales en los diferentes elementos en las hipótesis de cálculo.

Tabla XXV. Tensiones máximas de von Mises (MPa)

Hipótesis			I	II
T R A M O A	Viga cajón	Base	29	70.3
		Laterales	35.3	80.9
	Diafragmas e=10		43	105
	Diafragmas e=15		3.5	8.53
	Diafragmas e=18		4.36	10.6
T R A M O B	Viga cajón	Base	57.8	141
		Laterales	56.7	138
	Diafragmas e=15		66.1	162
	Diafragmas e=20		5.48	13.4
	Diafragmas e=22		7.26	17.8



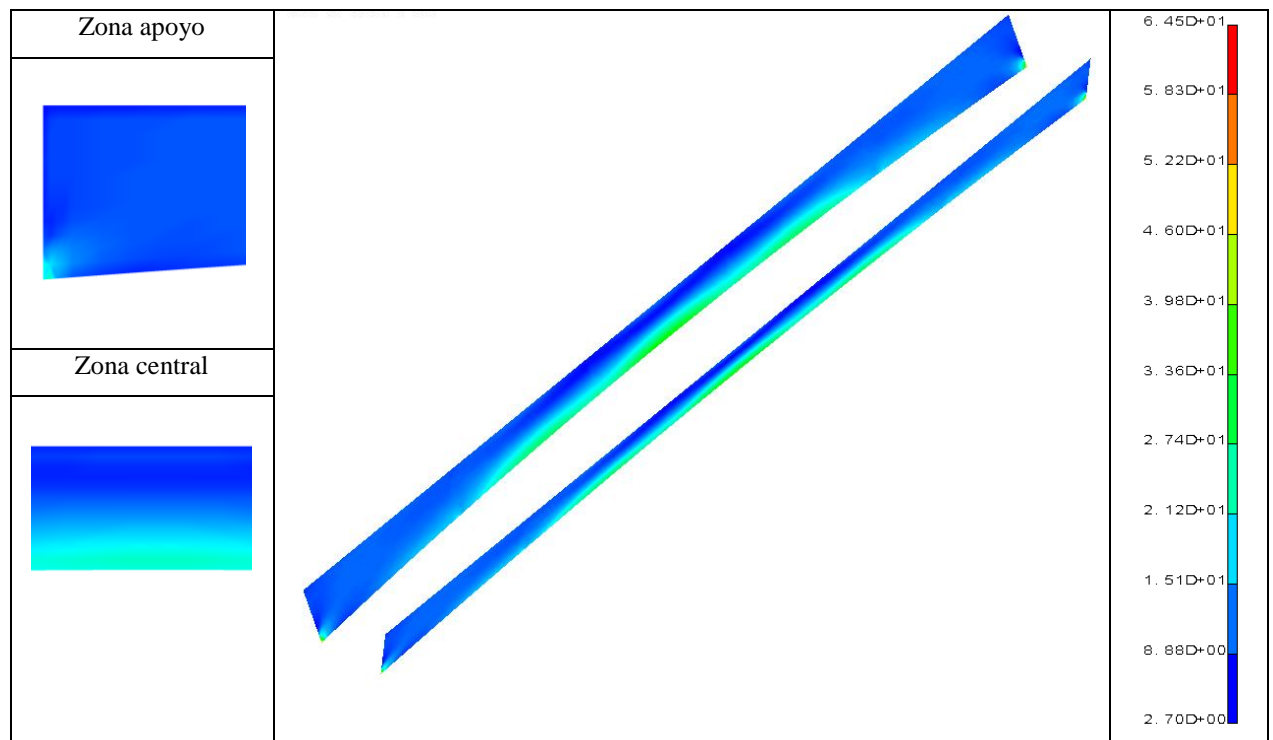


Fig. 118. Tensiones en las chapas laterales. ELU-I. Tramo A

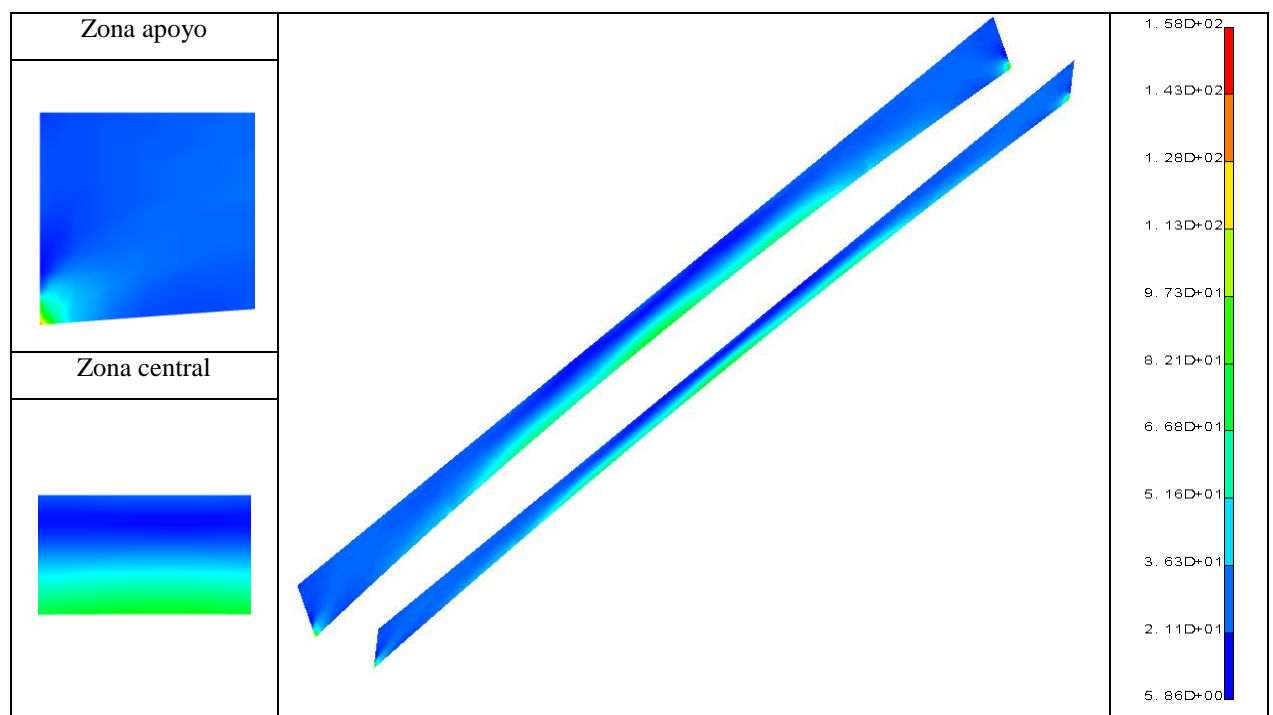
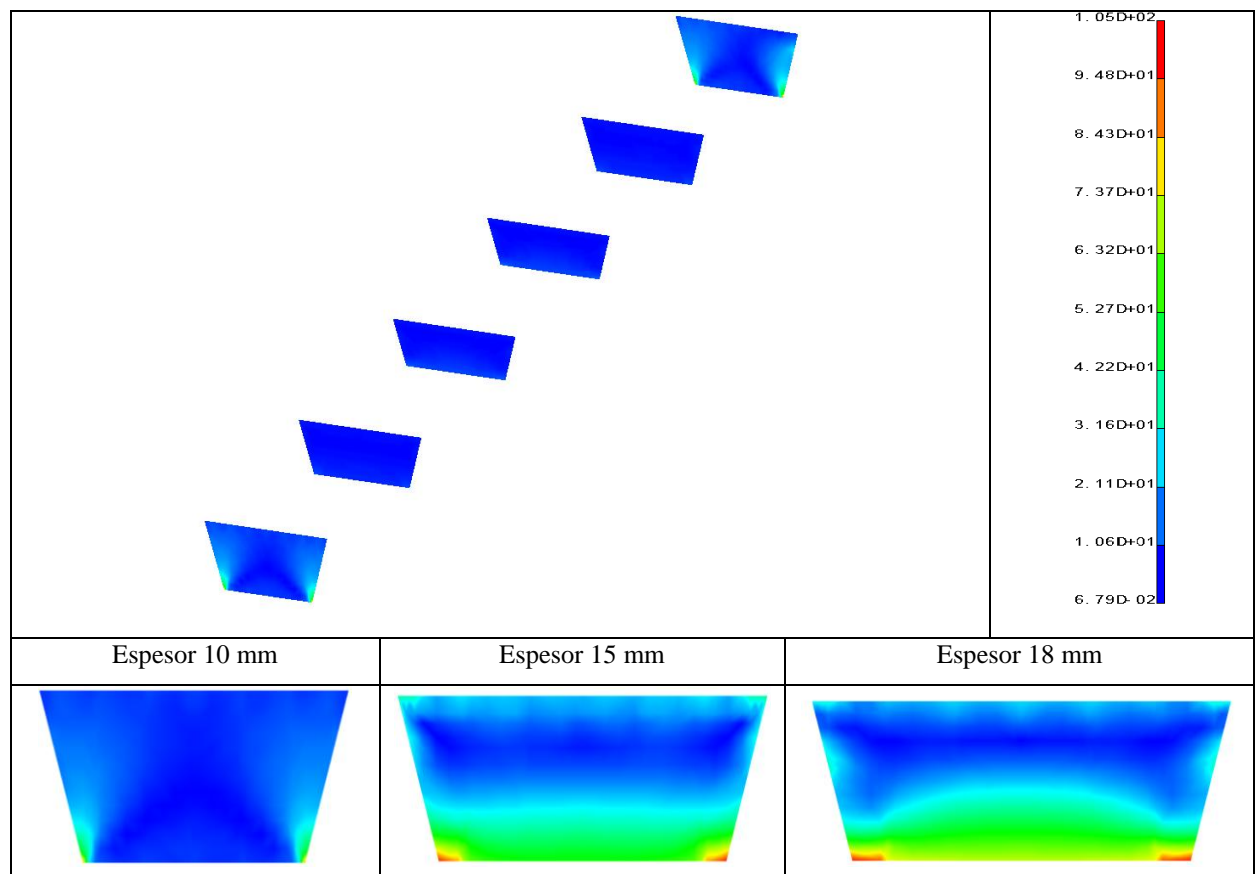
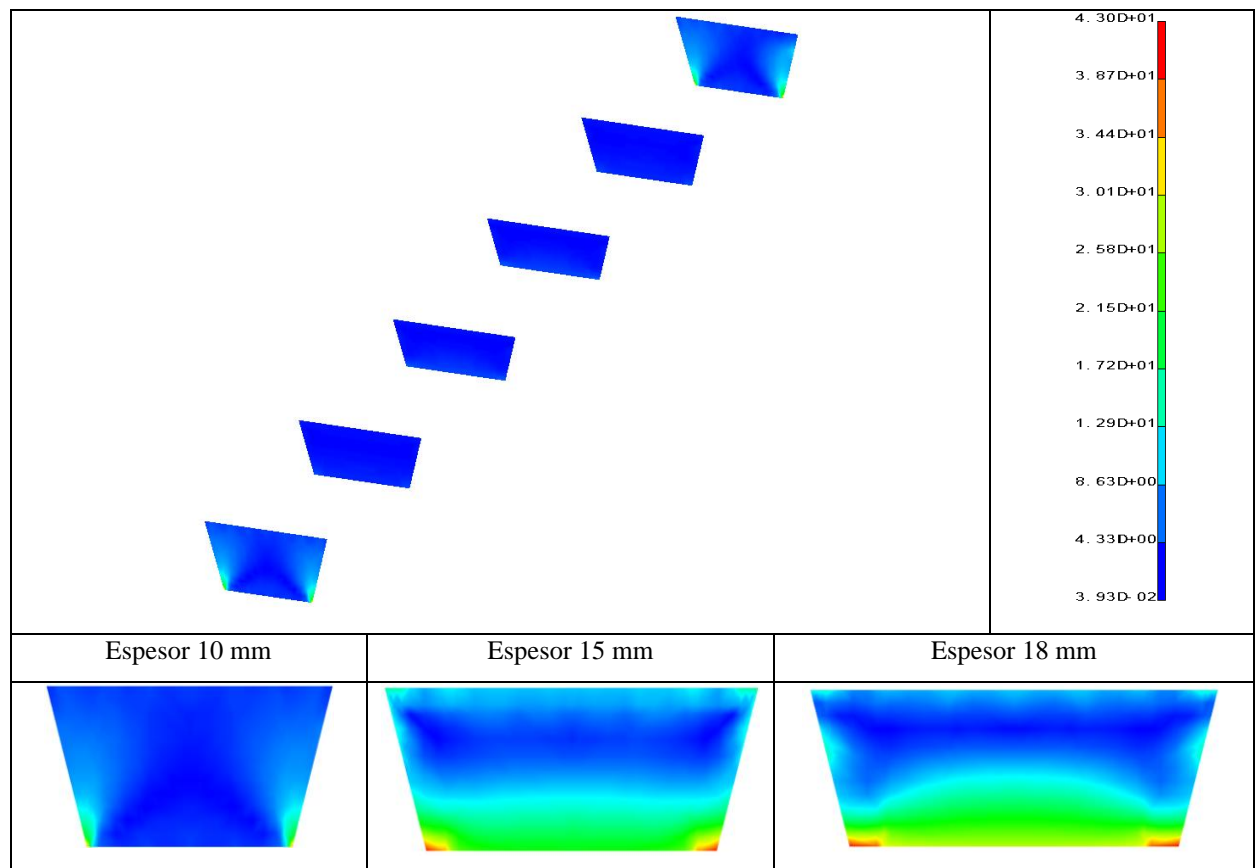


Fig. 119. Tensiones en las chapas laterales. ELU-II. Tramo A



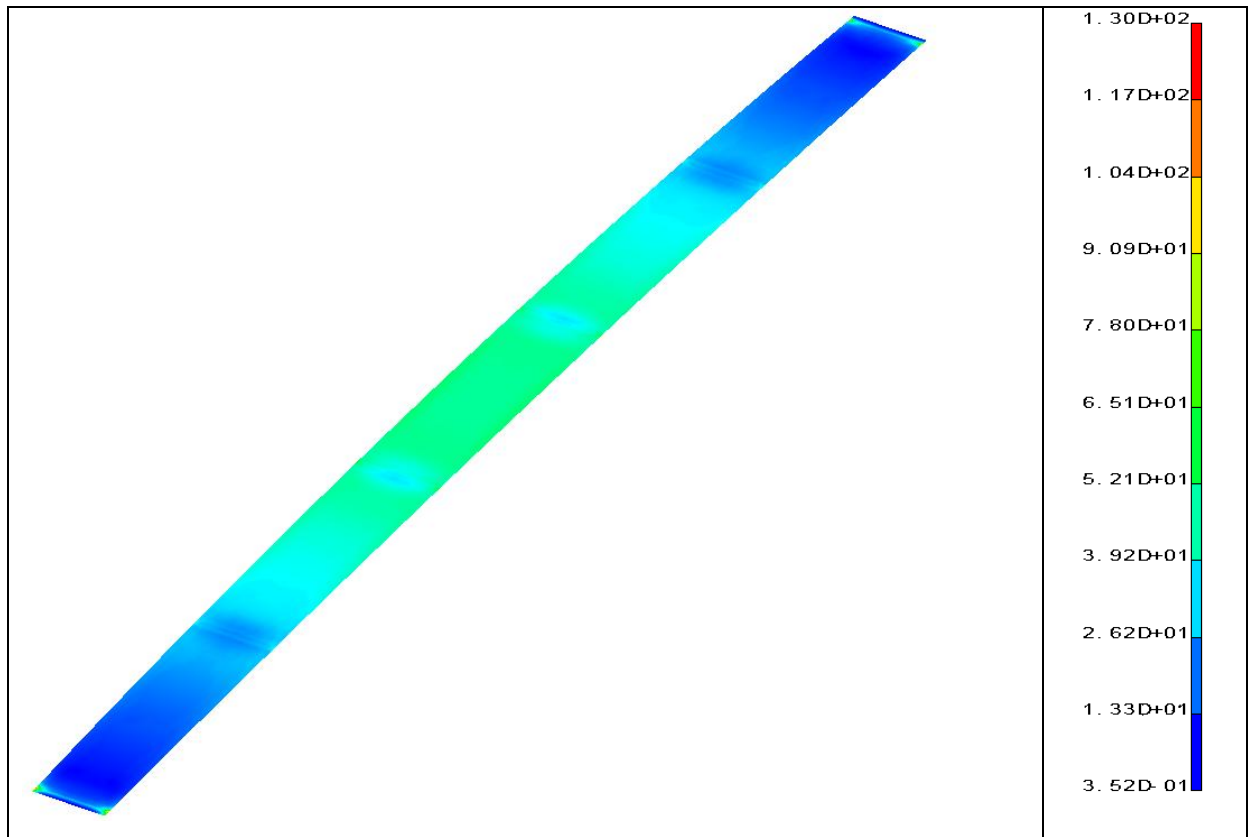


Fig. 122. Tensiones en la chapa base. ELU-I. Tramo B

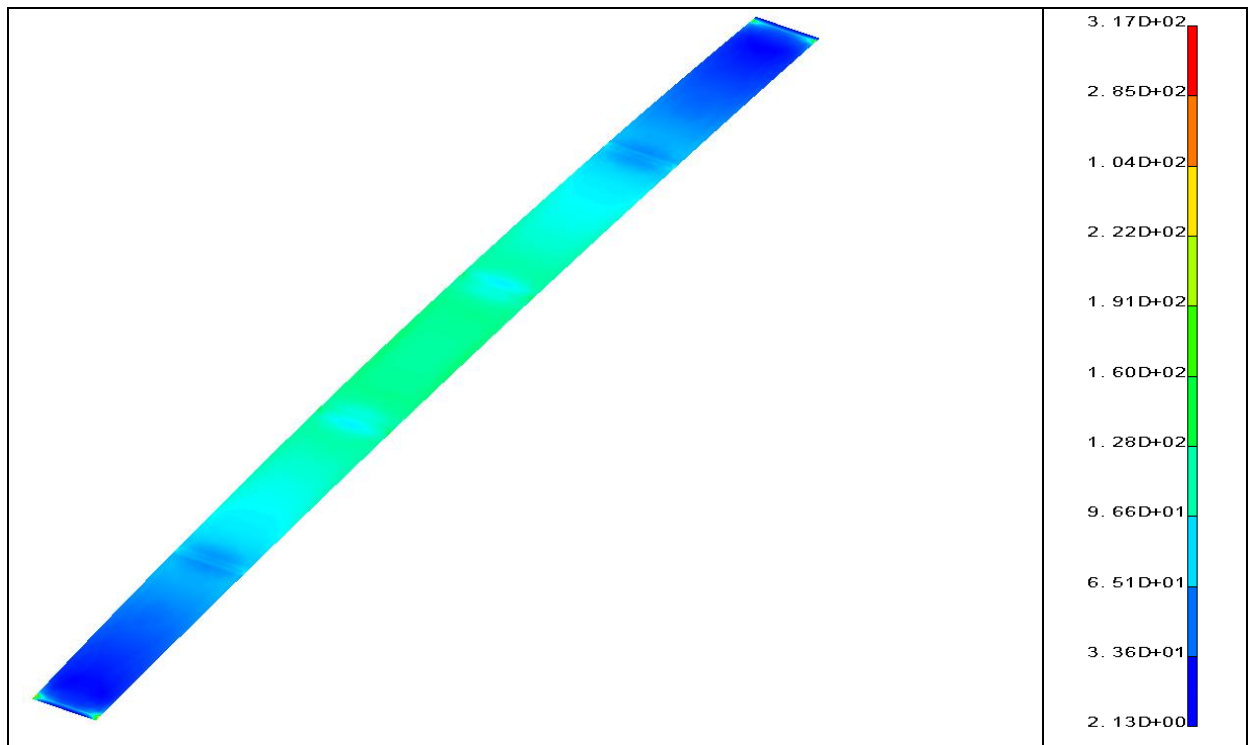


Fig. 123. Tensiones en la chapa base. ELU-II. Tramo B

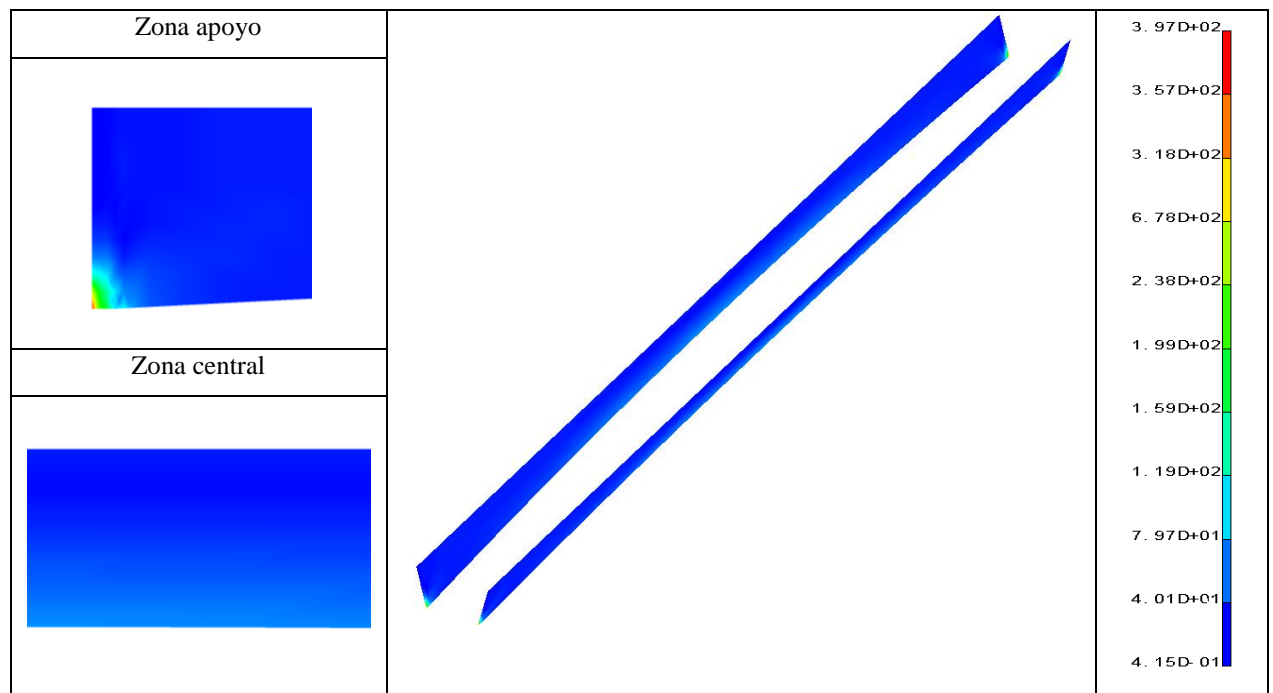


Fig. 124. Tensiones en las chapas laterales. ELU-I. Tramo B

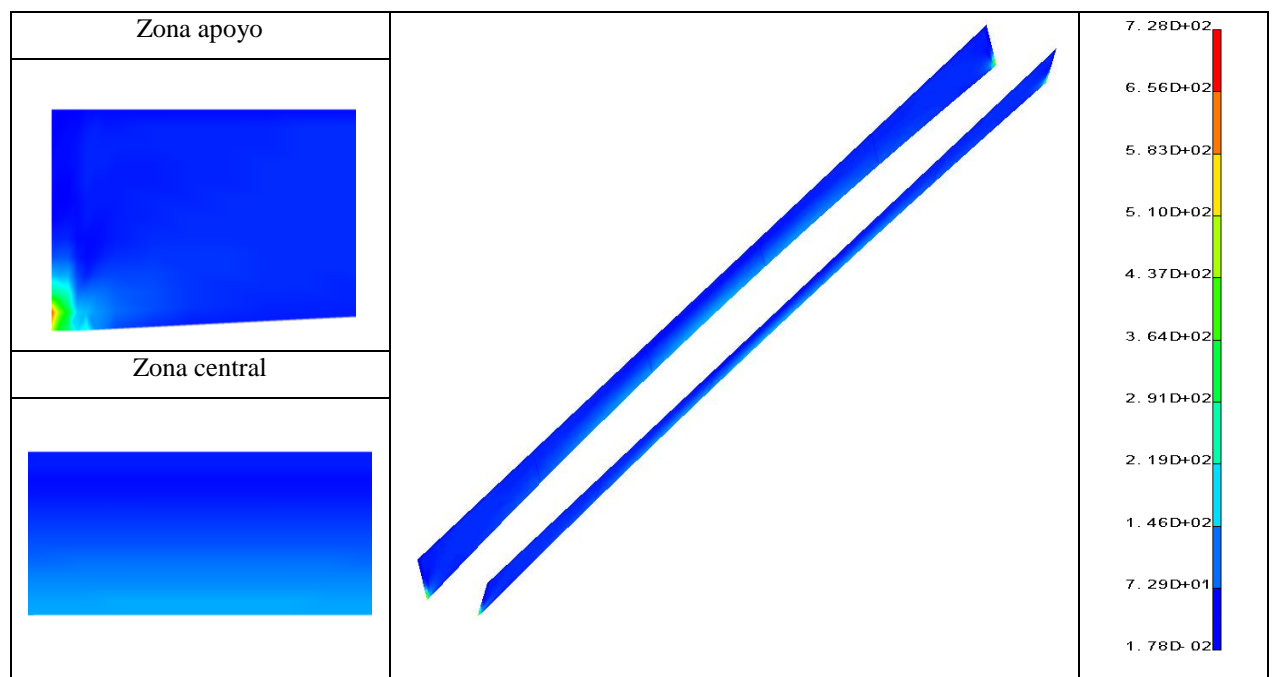
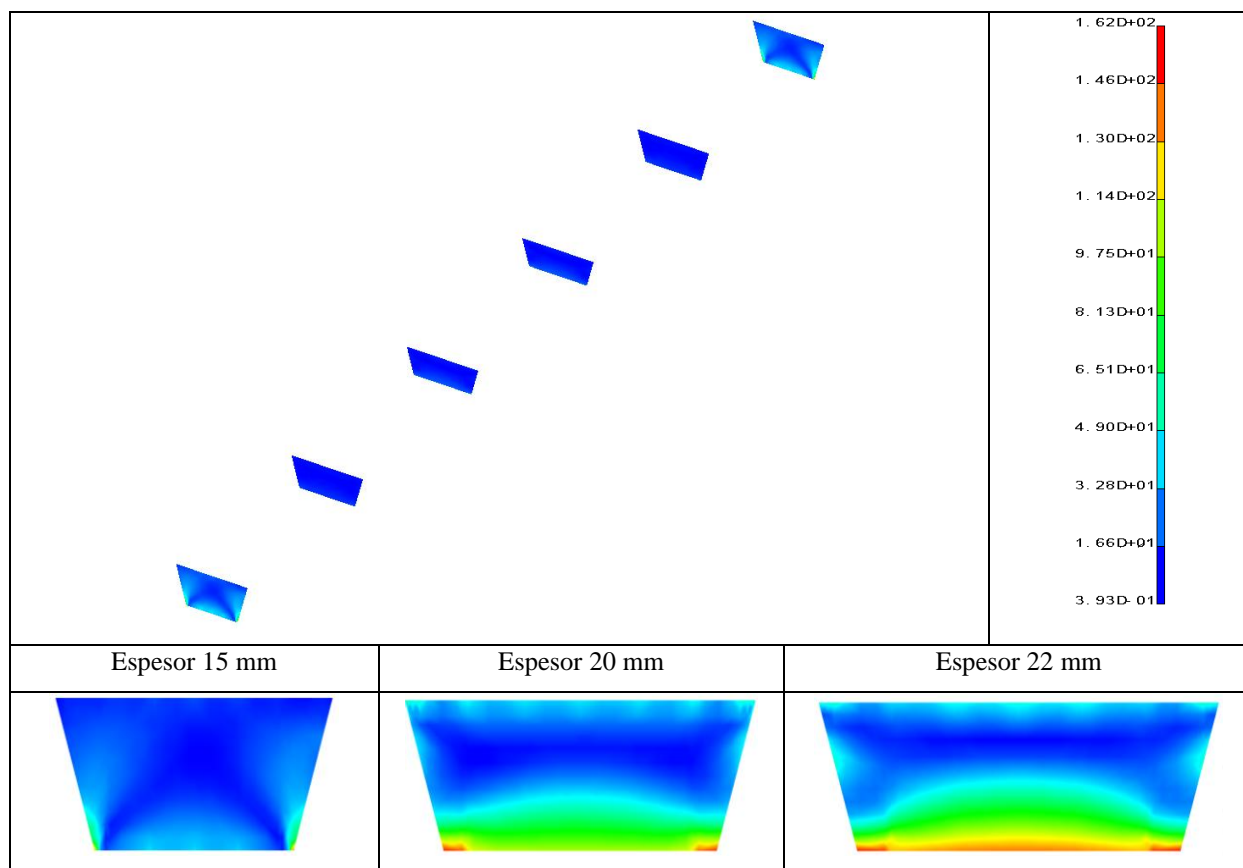
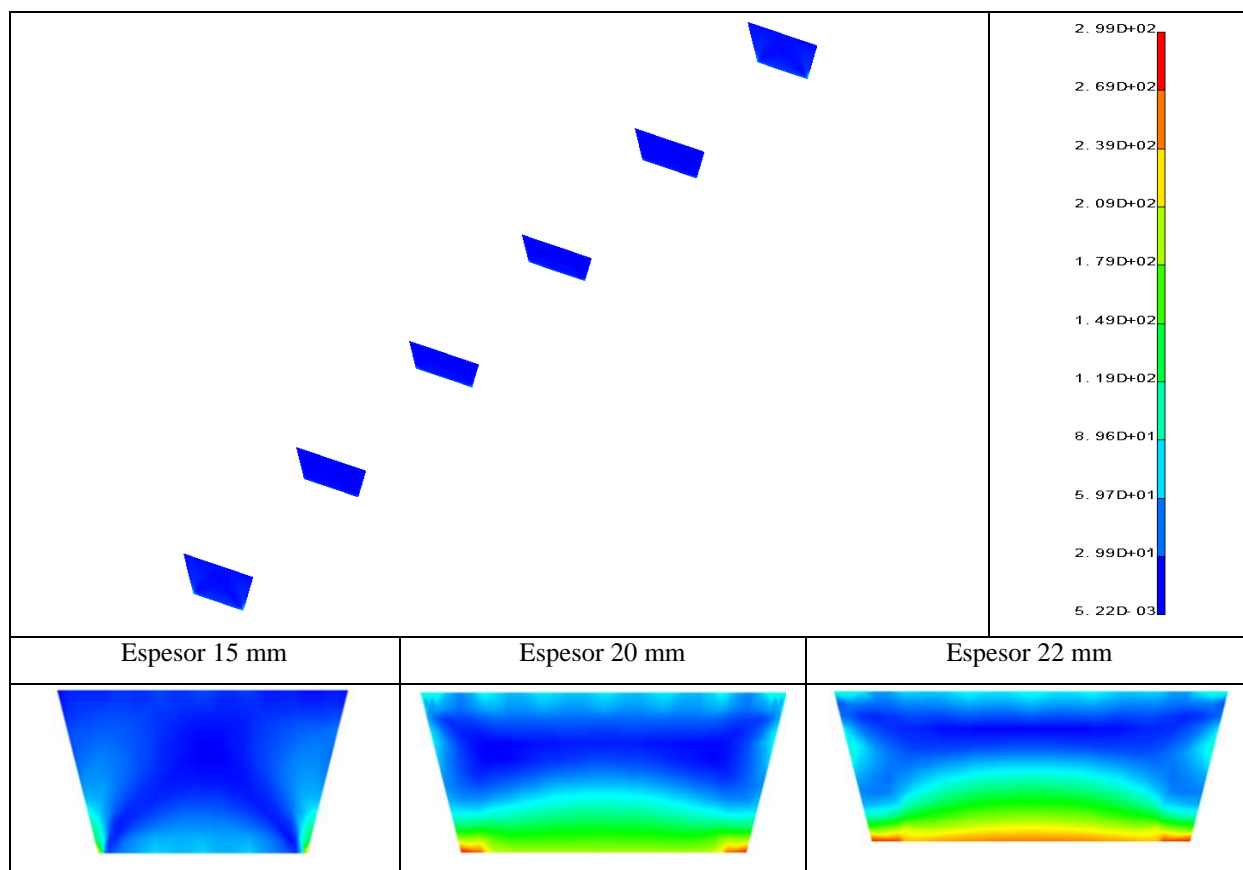


Fig. 125. Tensiones en las chapas laterales. ELU-II. Tramo B



Finalmente, por lo que respecta al forjado colaborante, en la Tabla XXVI se recogen los esfuerzos máximos para cada hipótesis.

Tabla XXVI. Esfuerzos máximos en forjado colaborante (kN/m, m.kN/m)

	Tramo A		Tramo B	
Hipótesis	I	II	I	II
Cortante	3.15	9.33	4.62	13.52
Flector	1.62	4.80	3.43	10.03

De acuerdo con estos esfuerzos, se adopta la disposición de armado que se detalla en los planos constructivos [Anexo].

Se recomienda que la conexión del tablero de hormigón con la viga cajón metálica se realice mediante conectores estándar de 16x75 mm, dispuestos a lo largo de las alas longitudinales (dos por ala) y transversales de la viga cajón, coincidiendo con los valles de la chapa colaborante, y a una distancia máxima de 600 mm (Fig. 128). Podrá utilizarse cualquier otra configuración de conectores o sistema de unión, siempre que se garantice la resistencia adecuada para soportar el esfuerzo rasante en la junta entre hormigón y acero.

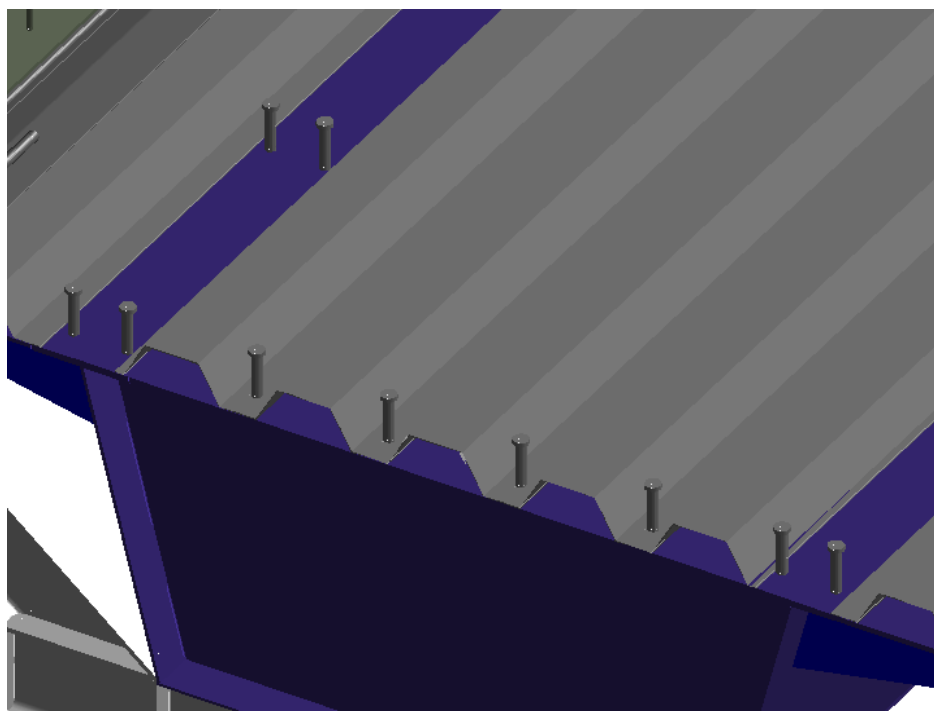


Fig. 128. Detalle conectadores en chapa colaborante y viga cajón

4.2. Cálculo de la dilatación

De cara a verificar el cambio de longitud máximo que puede producirse en la pasarela debido a los efectos térmicos, se realiza un cálculo de dilatación para un incremento de temperatura de 40° C. Se incluye a continuación la deformada para el tramo A y B.

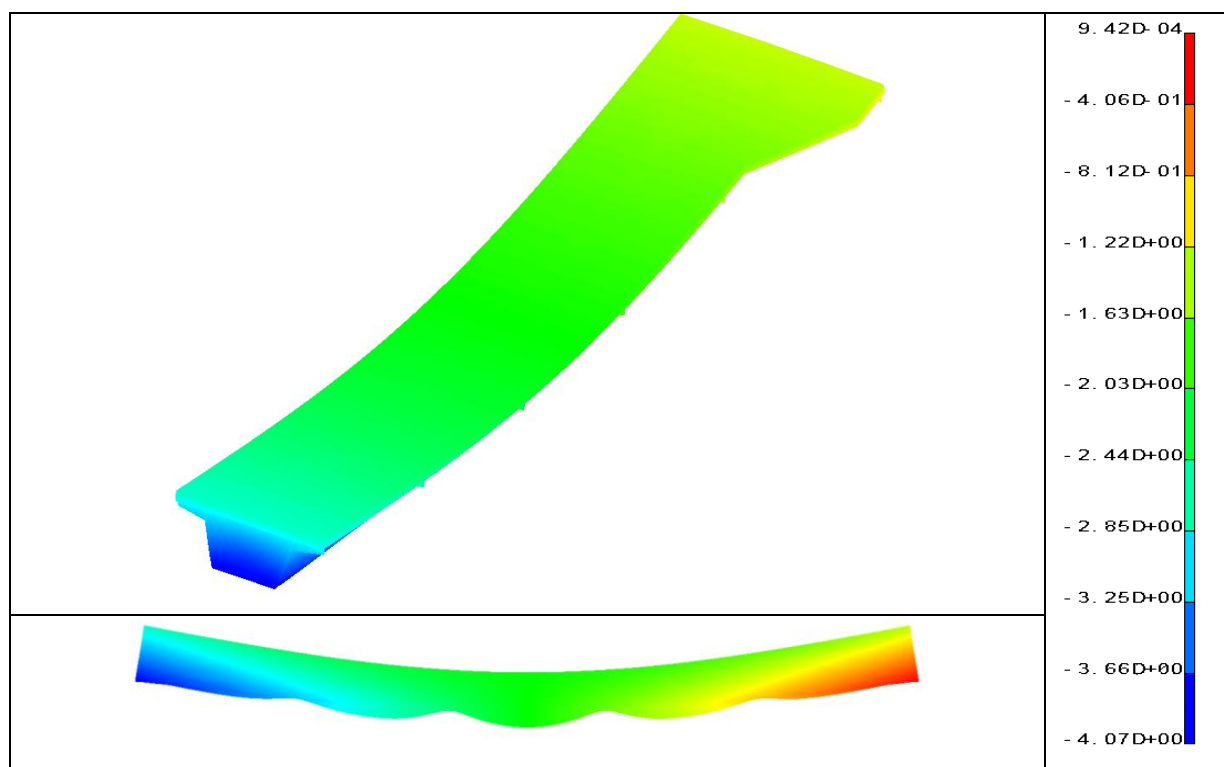


Fig. 129. Deformada e indeformada. Tramo A (x100)

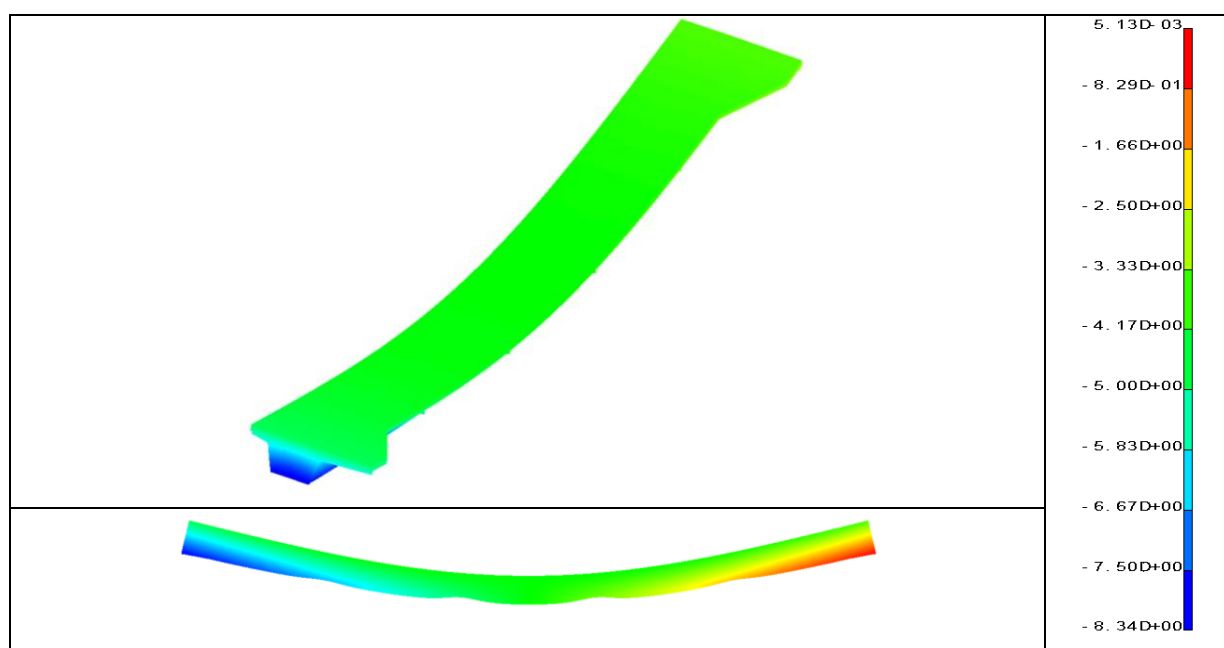


Fig. 130. Deformada e indeformada. Tramo B (x50)

El incremento de longitud total es de 4.1 mm, aproximadamente, con un desplazamiento horizontal de 2.05 mm en cada apoyo, para el módulo tipo A, y de 8.4 mm, aproximadamente, con un desplazamiento horizontal de 4.2 mm en cada apoyo, para el módulo tipo B.

El incremento en las tensiones debido al incremento de temperatura producidas por flexión resultan inapreciables, ya que se trata de una dilatación prácticamente libre, con la única restricción de los apoyos de neopreno, que deben resultar suficientemente flexibles para permitirla.

4.3. Análisis de estabilidad

A partir de los modelos de cálculo, se obtienen los factores de carga crítica para la pasarela. En las Figs. 131 a 140 se muestran los cinco primeros modos de inestabilidad y los factores de carga crítica asociados para las diferentes hipótesis analizadas.

Hipótesis ELU-II

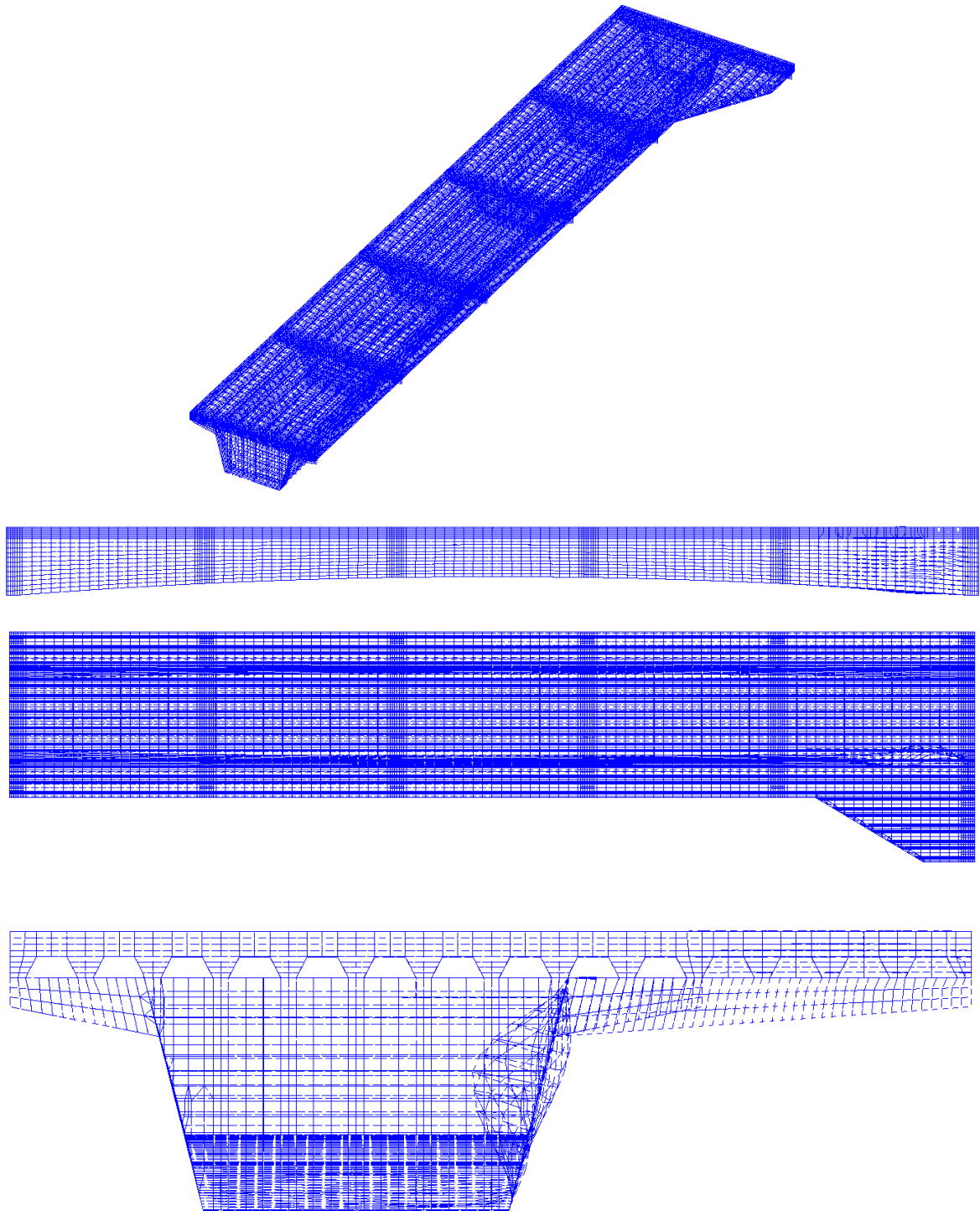


Fig. 131. Modo 1. Pandeo global ($\lambda_{\text{crf}}=15.832$). Tramo A

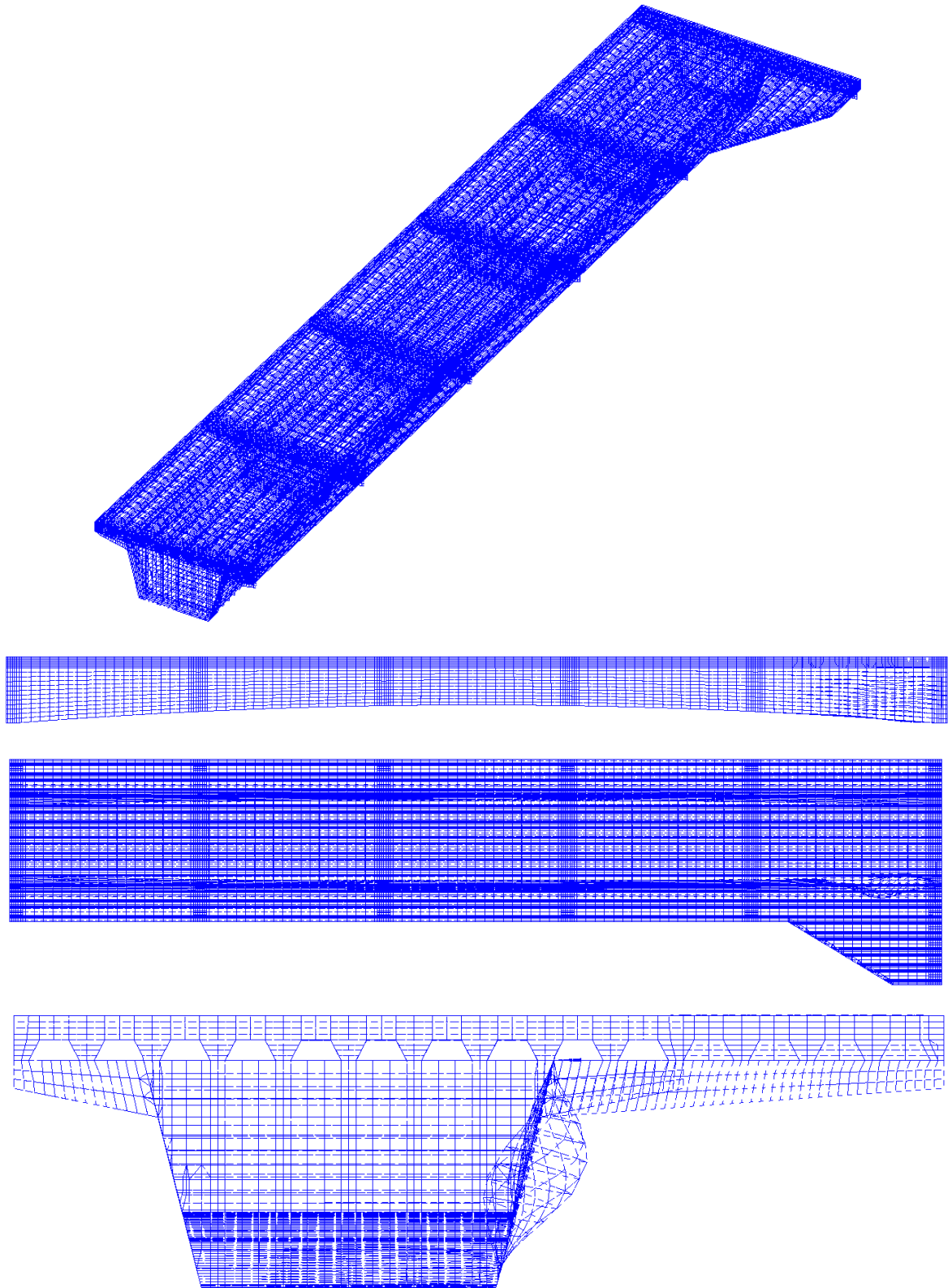


Fig. 132. Modo 2. Abolladura ($\lambda_{\text{crf}}=17.117$). Tramo A

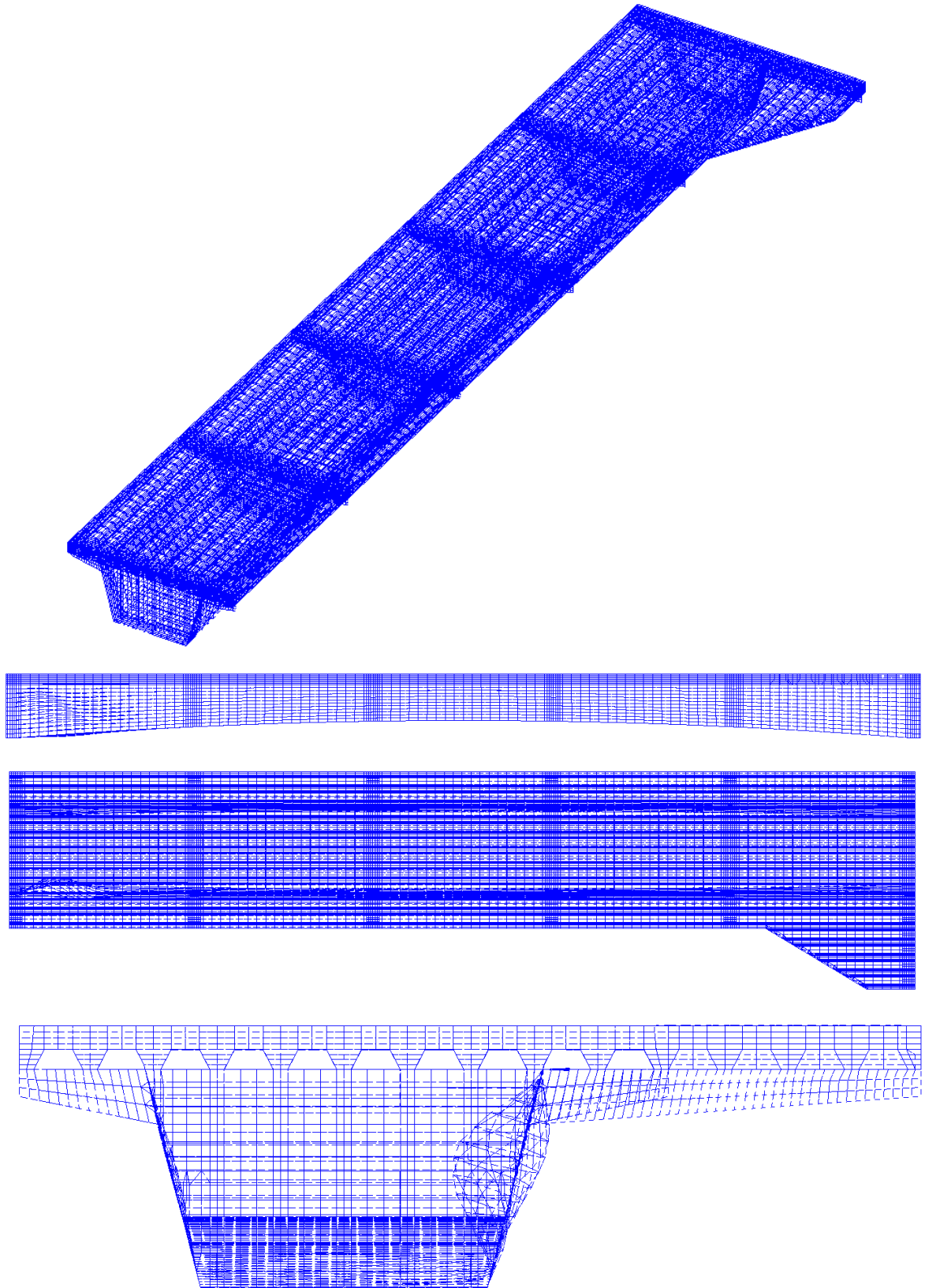


Fig. 133. Modo 3. Abolladura ($\lambda_{\text{crf}}=17.511$). Tramo A

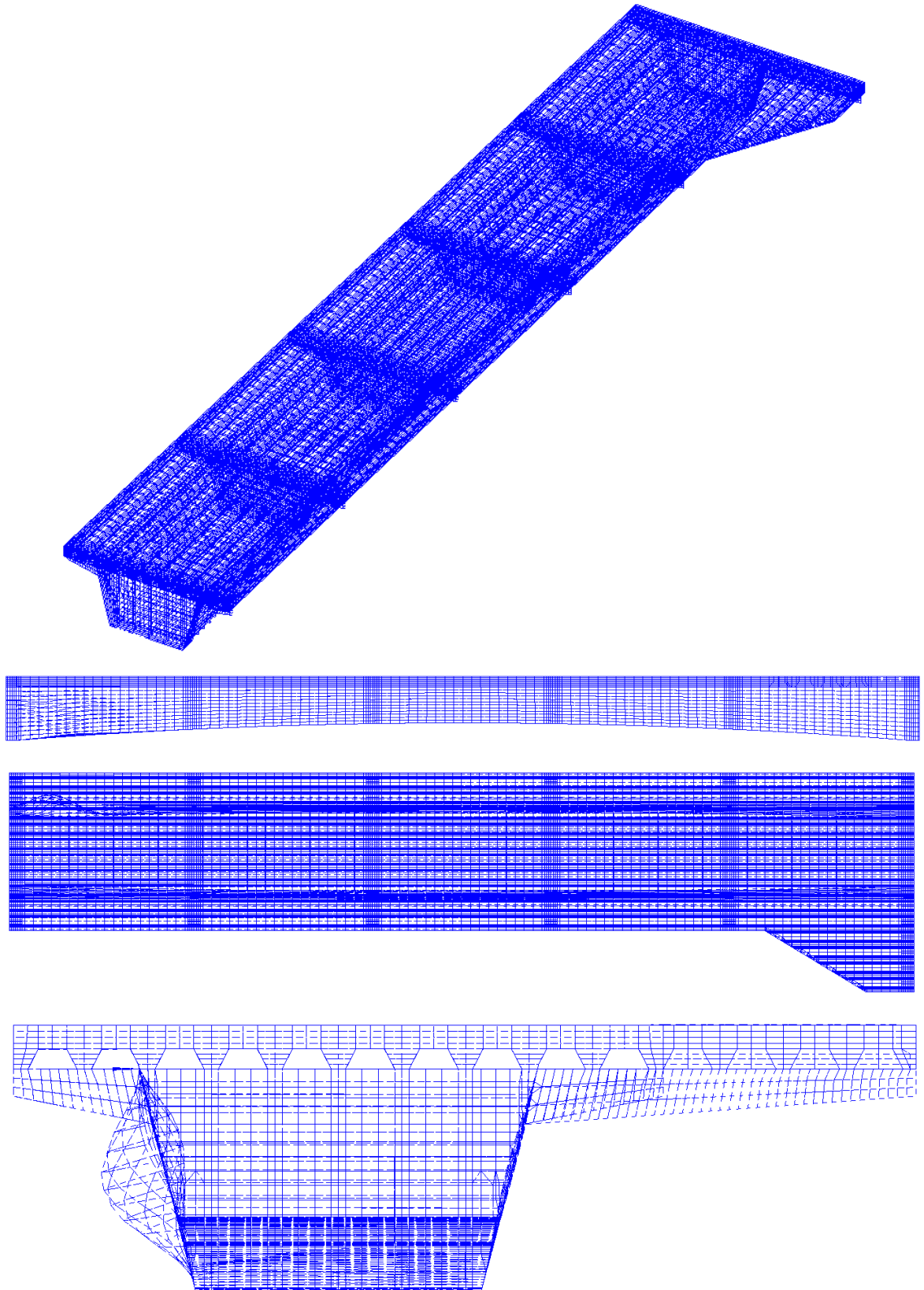


Fig. 134. Modo 4. Abolladura ($\lambda_{\text{crf}}=17.934$). Tramo A

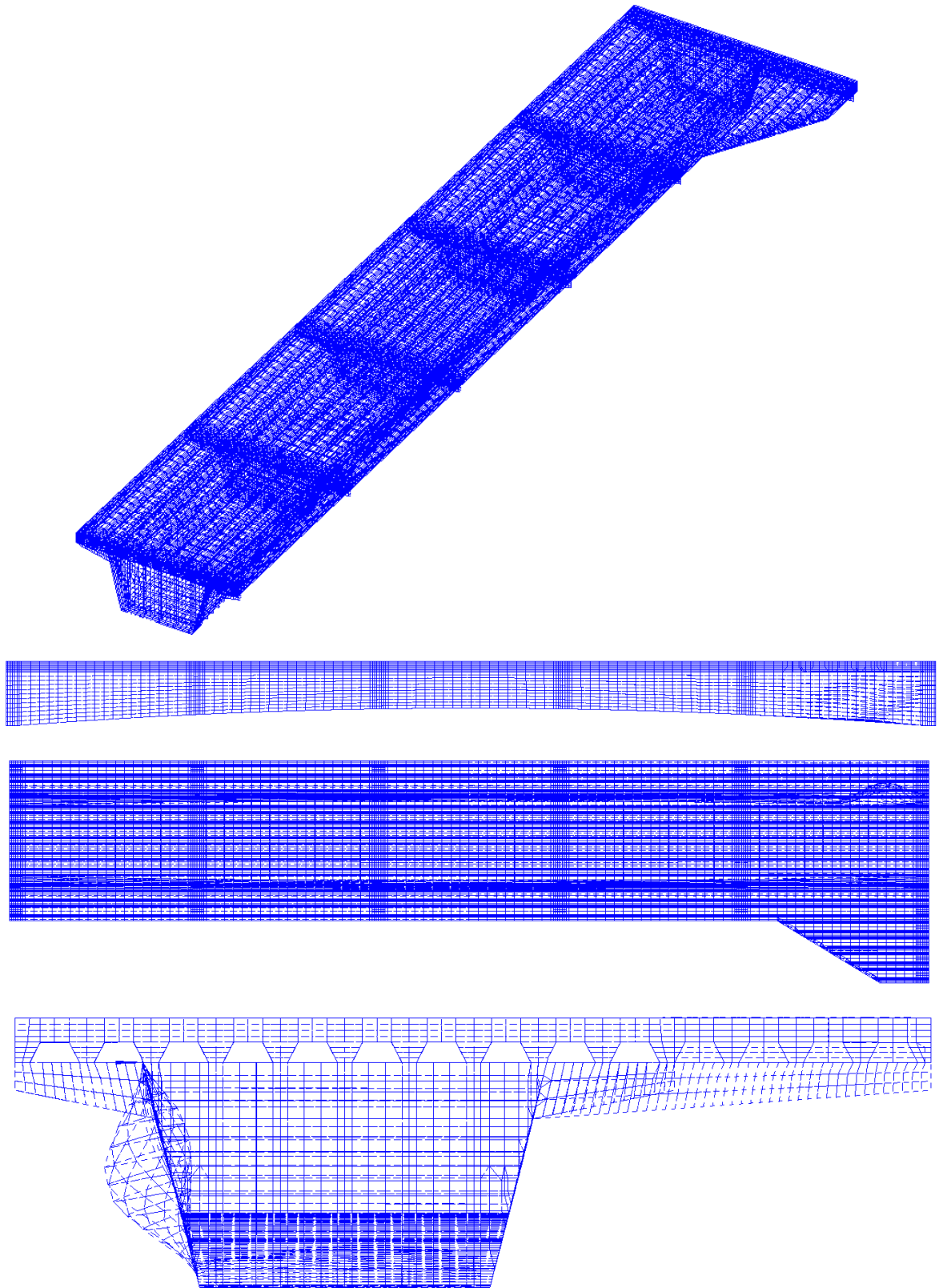


Fig. 135. Modo 5. Abolladura ($\lambda_{\text{cri}}=18.491$). Tramo A

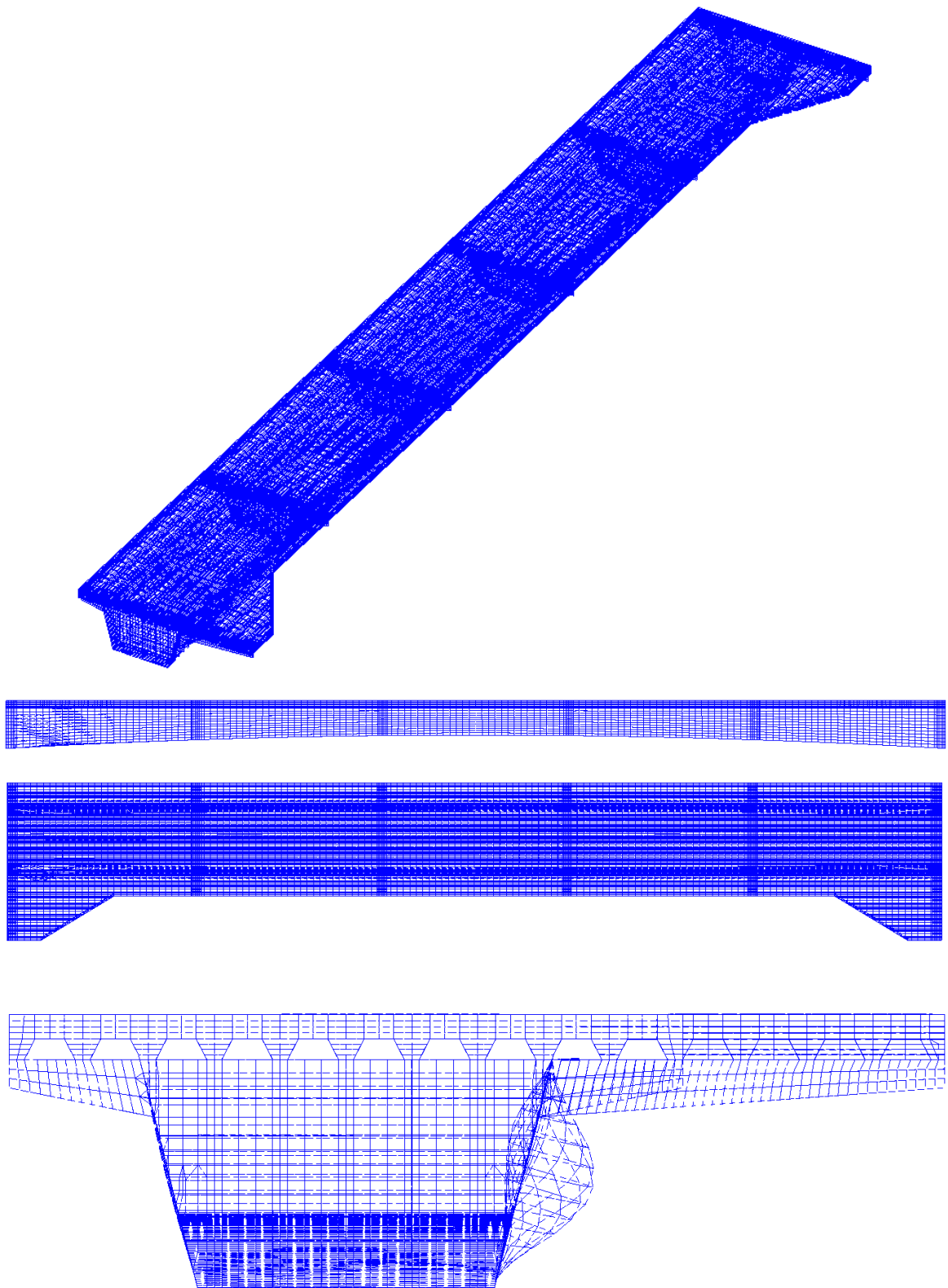


Fig. 136. Modo 1. Pandeo global ($\lambda_{\text{crf}}=11.035$). Tramo B

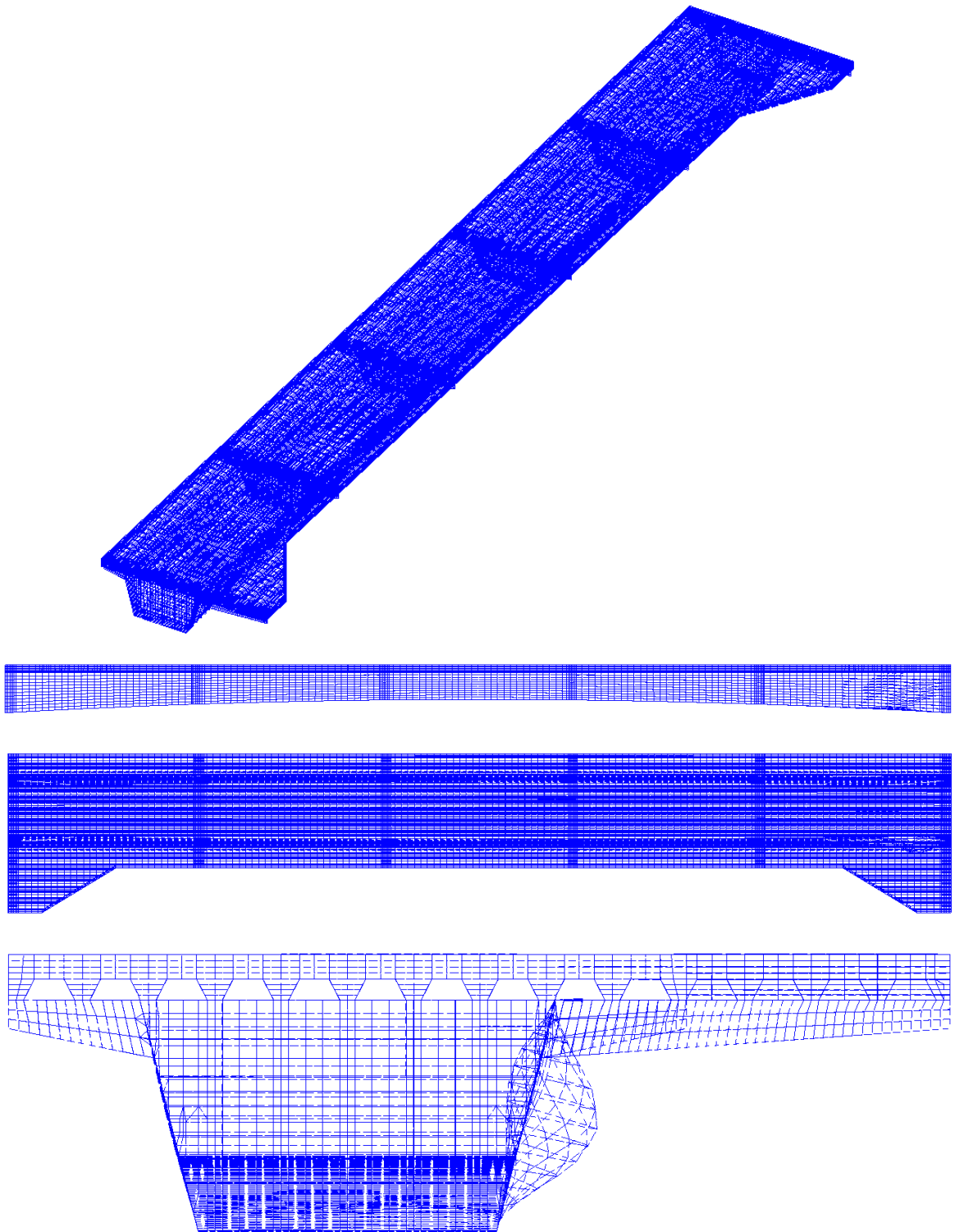


Fig. 137. Modo 2. Abolladura ($\lambda_{\text{cr}}=11.232$). Tramo B

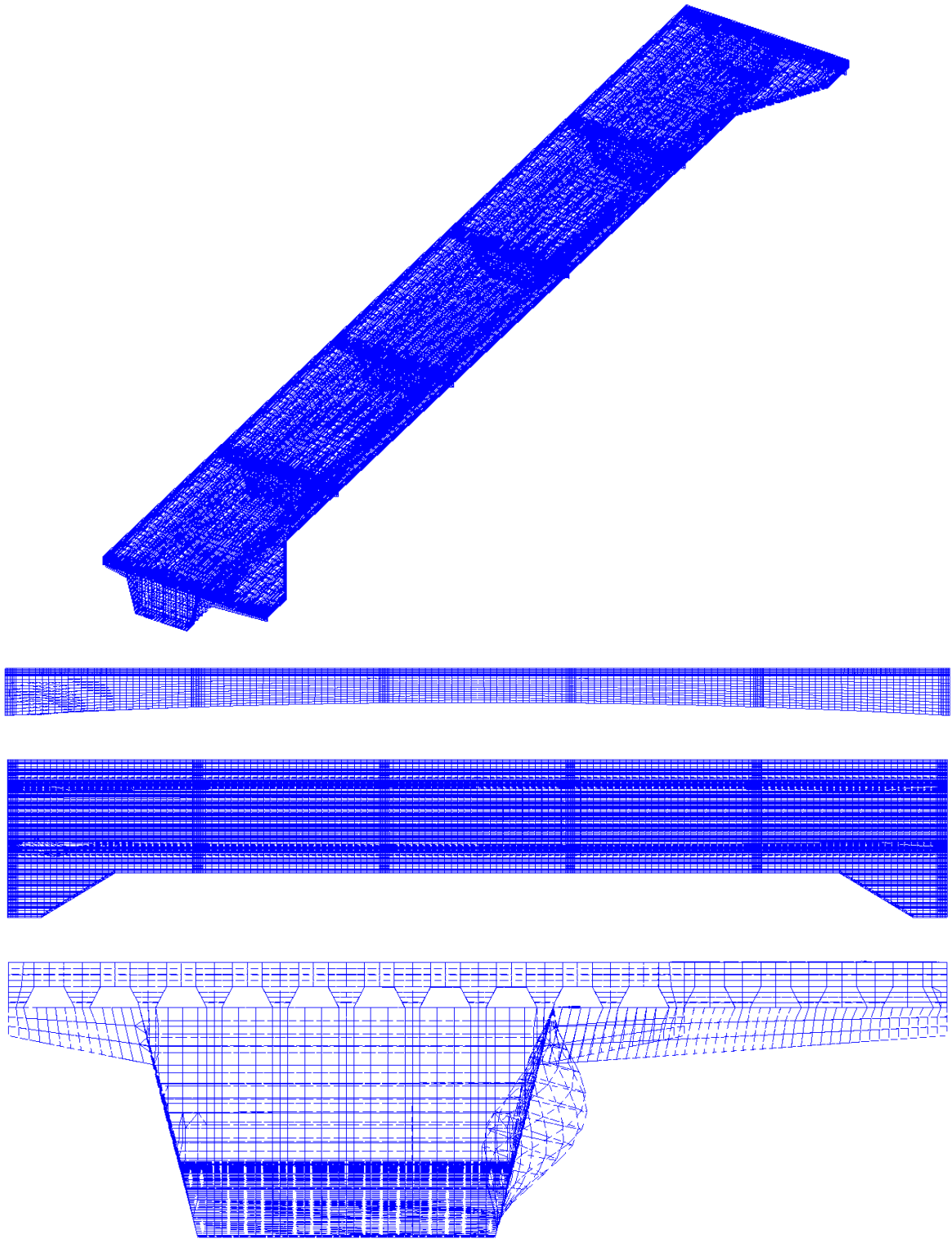


Fig. 138. Modo 3. Abolladura ($\lambda_{\text{cr}}=11.777$). Tramo B

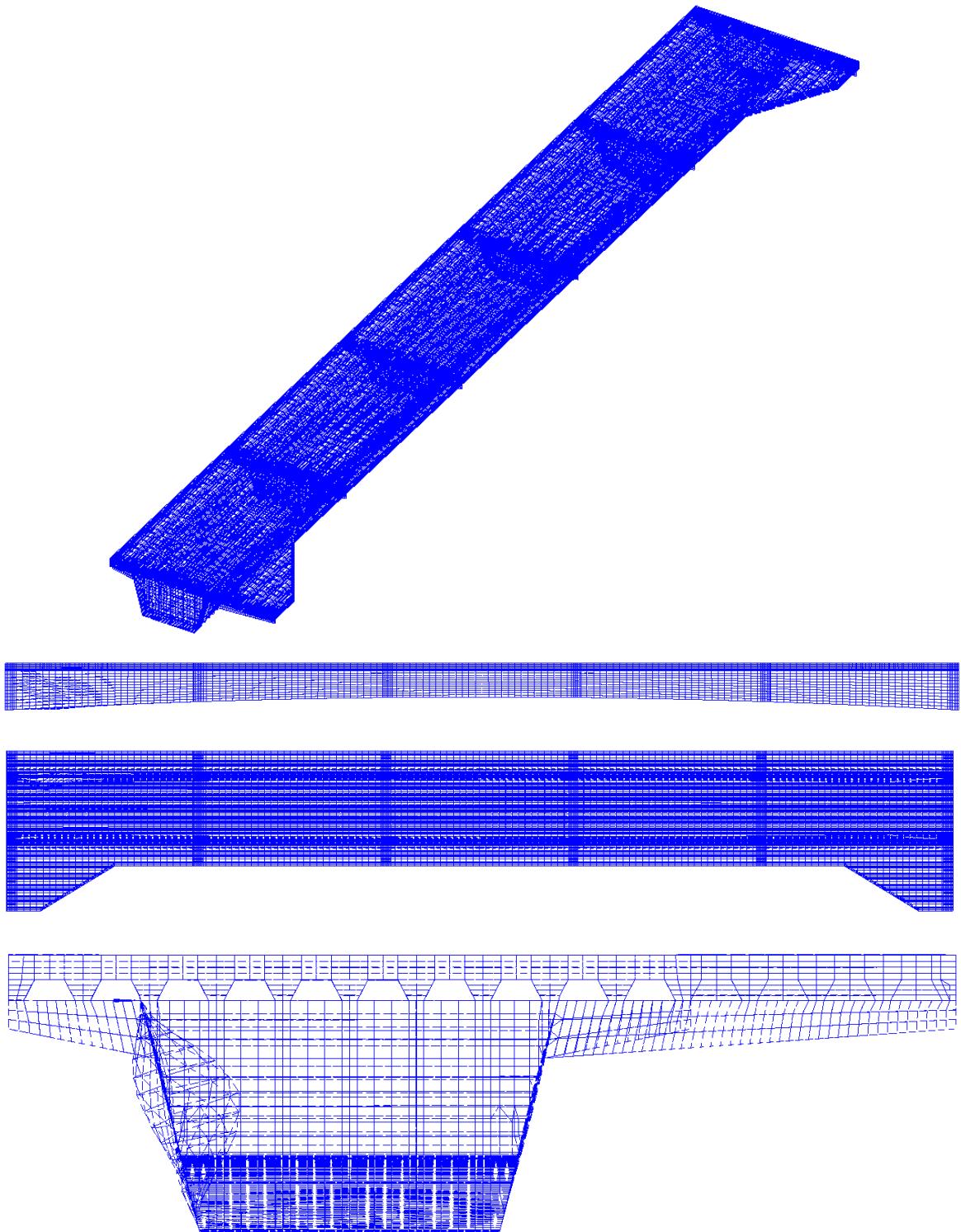


Fig. 139. Modo 4. Abolladura ($\lambda_{\text{crf}}=11.787$). Tramo B

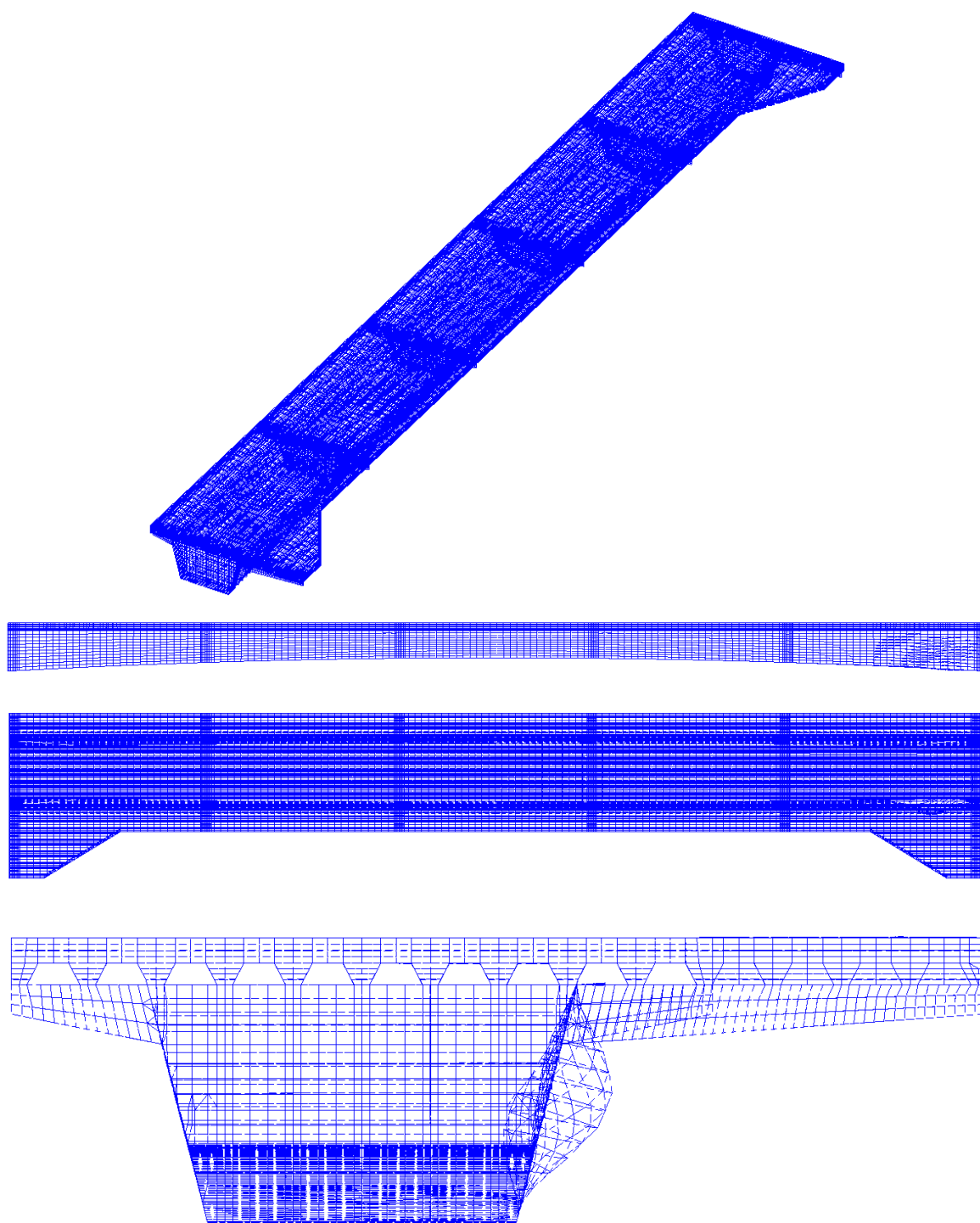


Fig. 140. Modo 5. Abolladura ($\lambda_{crf}=11.883$). Tramo B

Como se desprende de los resultados, el factor de carga crítica mínimo corresponde, en ambos tramos, al primer modo de inestabilidad local de la pasarela, situándose por encima del límite de 6 establecido a priori. A continuación, aparecen modos adicionales de inestabilidad local, con factores por encima de 15 en todos los casos en el tramo A, y por encima de 11 en todos los casos en el tramo B.

4.4. Análisis de vibraciones

A partir de los modelos de cálculo, se obtienen las frecuencias y modos propios de vibración de la pasarela. Los cinco primeros modos, junto con sus frecuencias, se muestran en las Figs. 141 a 150.

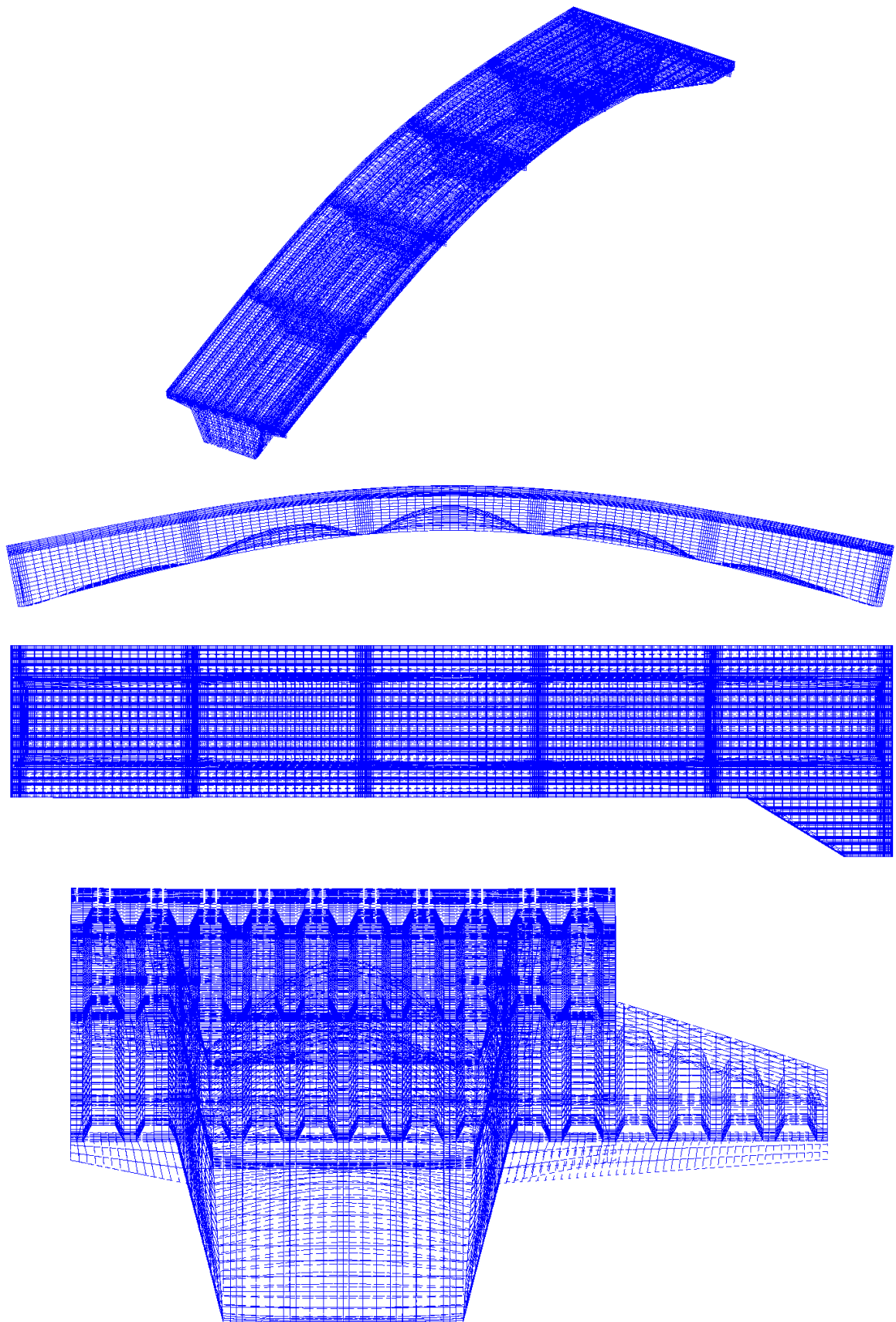


Fig. 141. Modo S-1 (10.486 Hz). Tramo A.

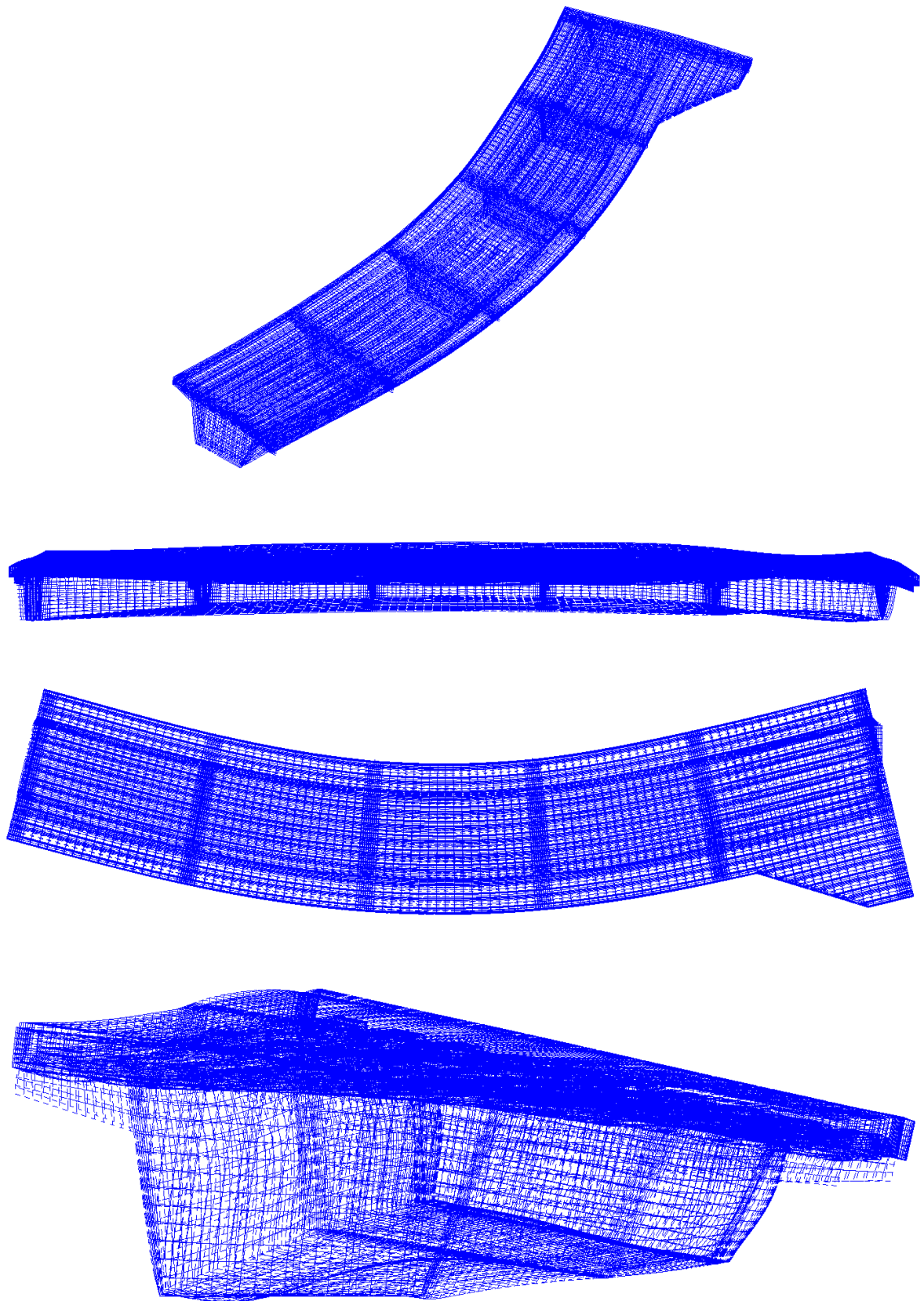


Fig. 142. Modo S-2 (12.059 Hz). Tramo A.

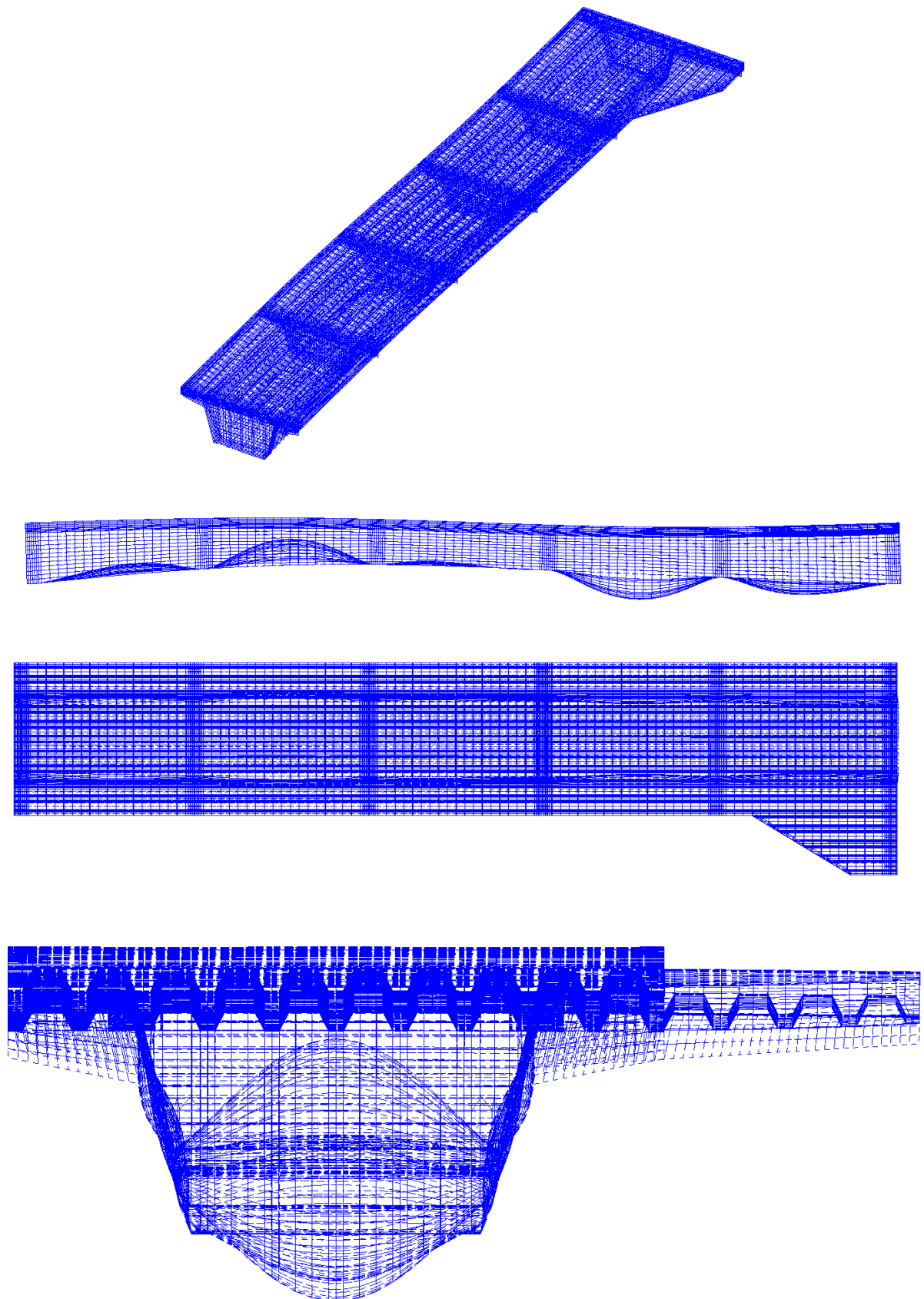


Fig. 143. Modo S-3 (33.546 Hz). Tramo A.

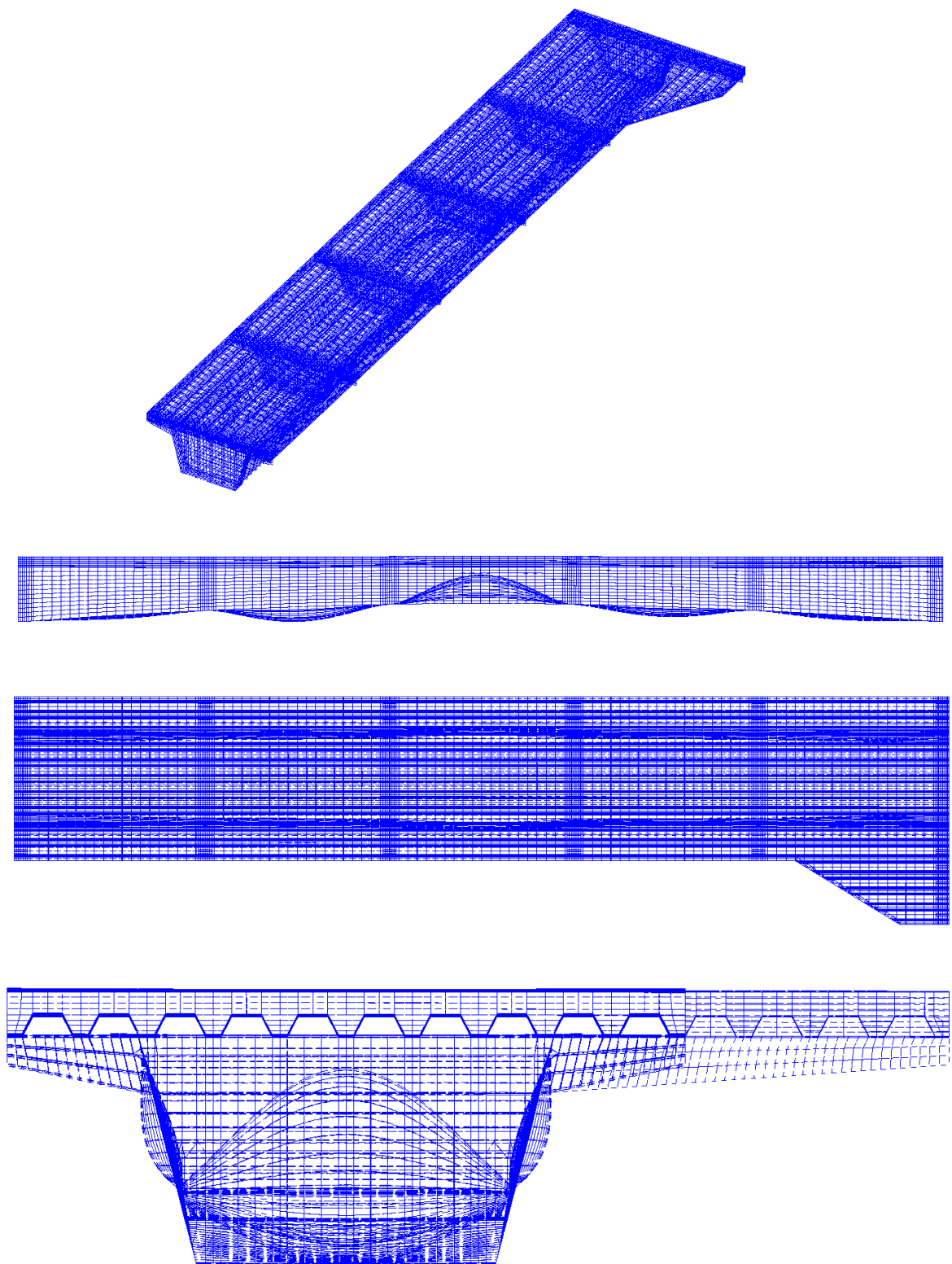


Fig. 144. Modo S-4 (39.637 Hz). Tramo A.

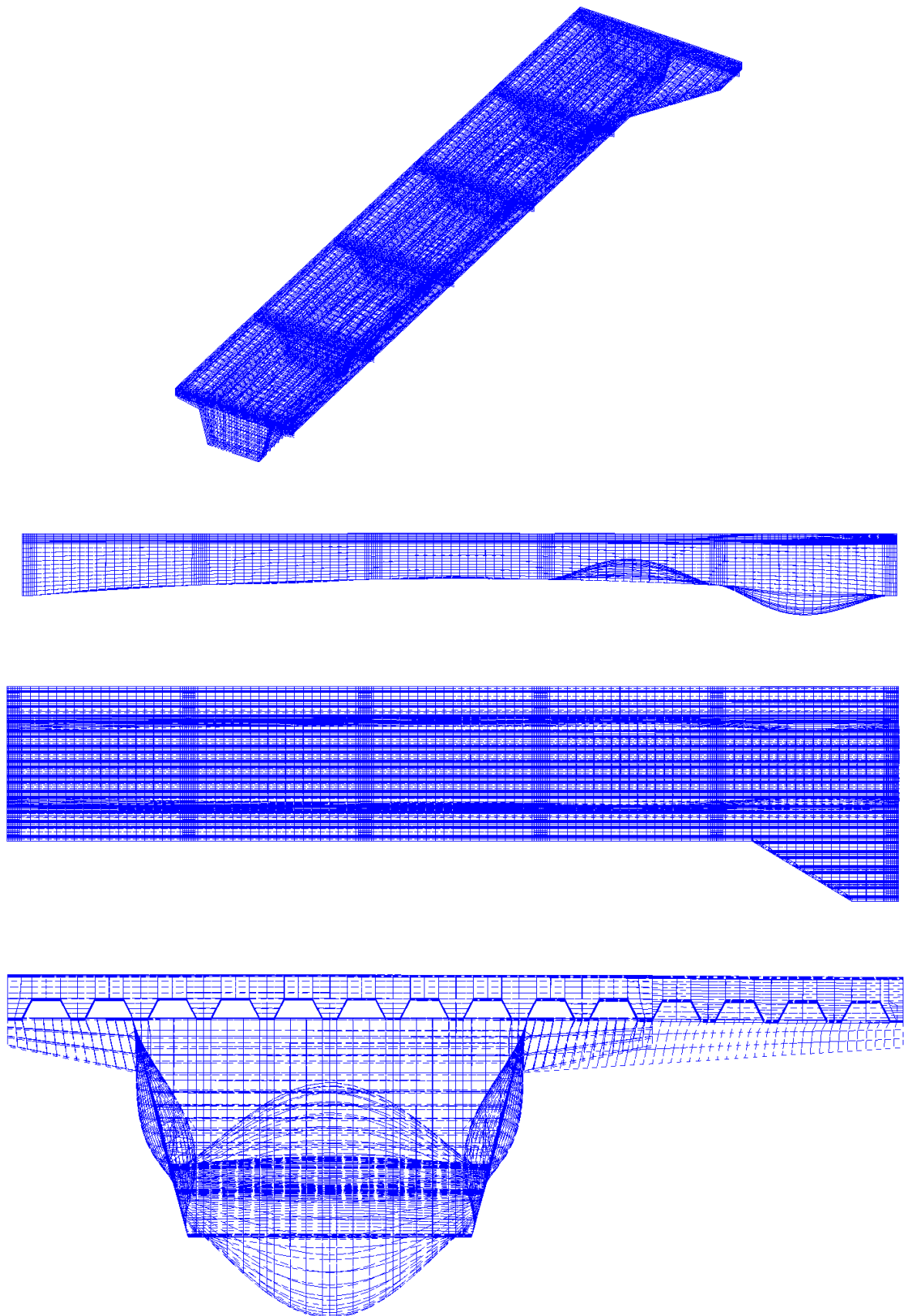


Fig. 145. Modo S-5 (41.321 Hz). Tramo A.

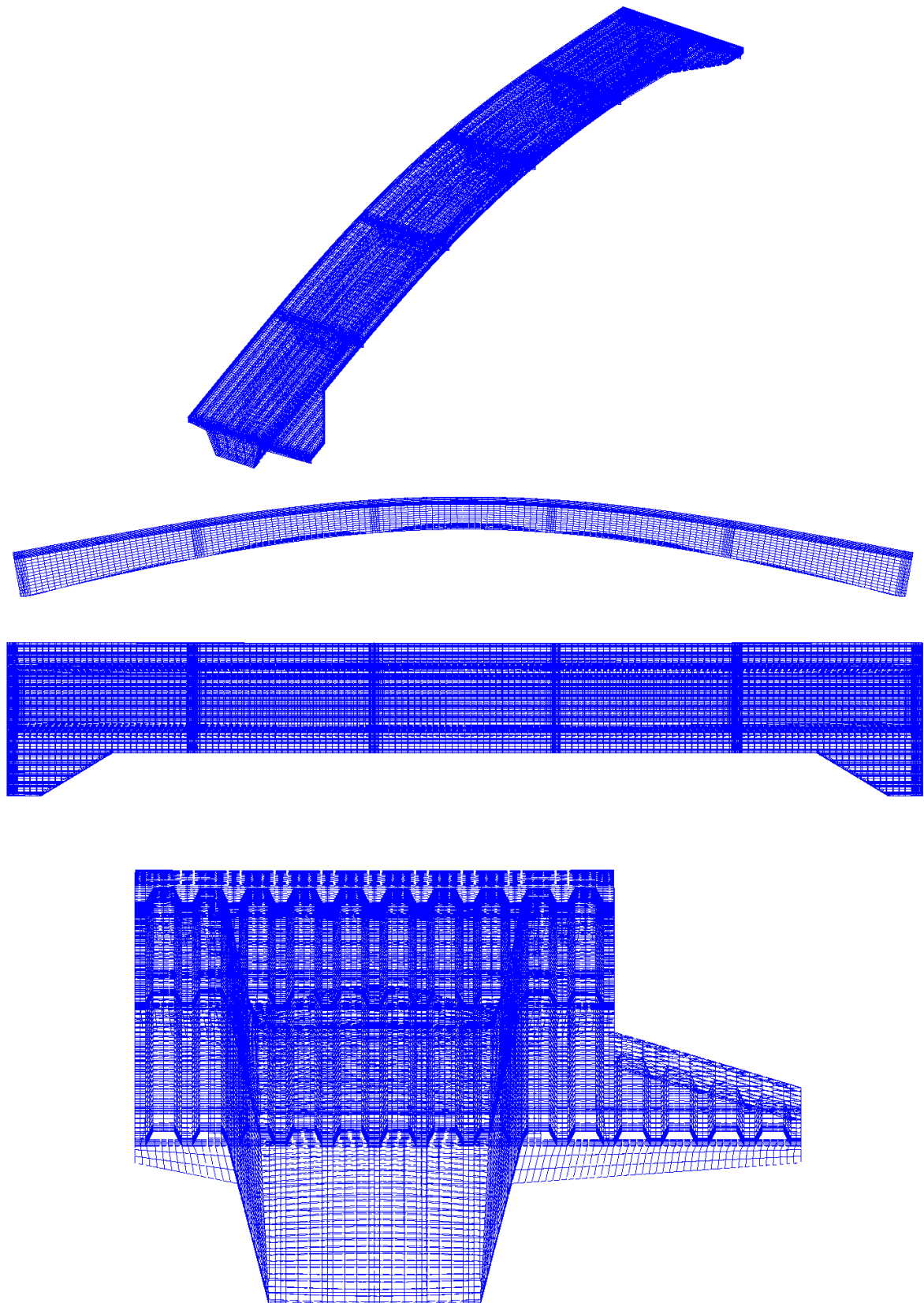


Fig. 146. Modo S-1 (5.407 Hz). Tramo B.

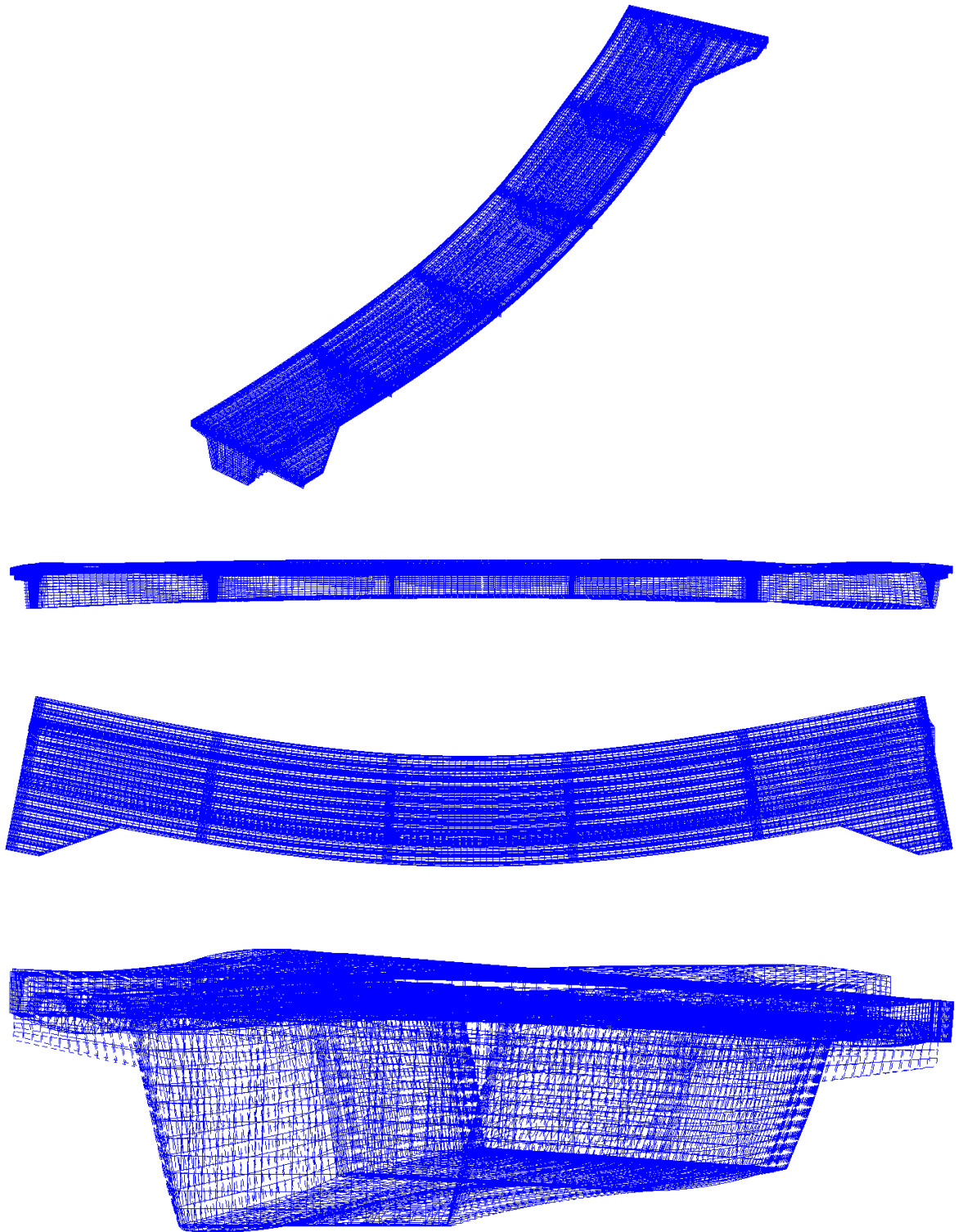


Fig. 147. Modo S-2 (14.255 Hz). Tramo B.

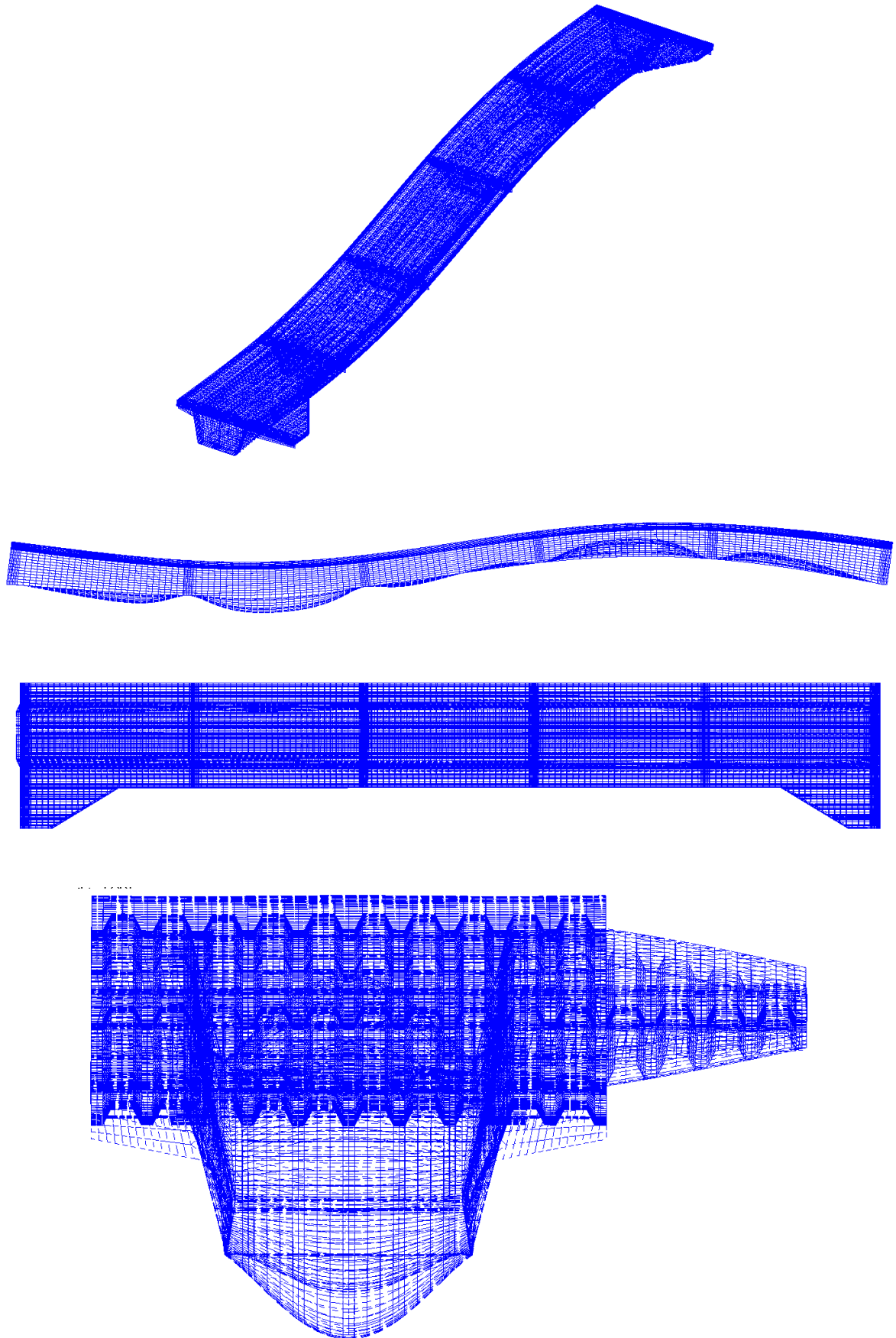


Fig. 148. Modo S-3 (20.117 Hz). Tramo B.

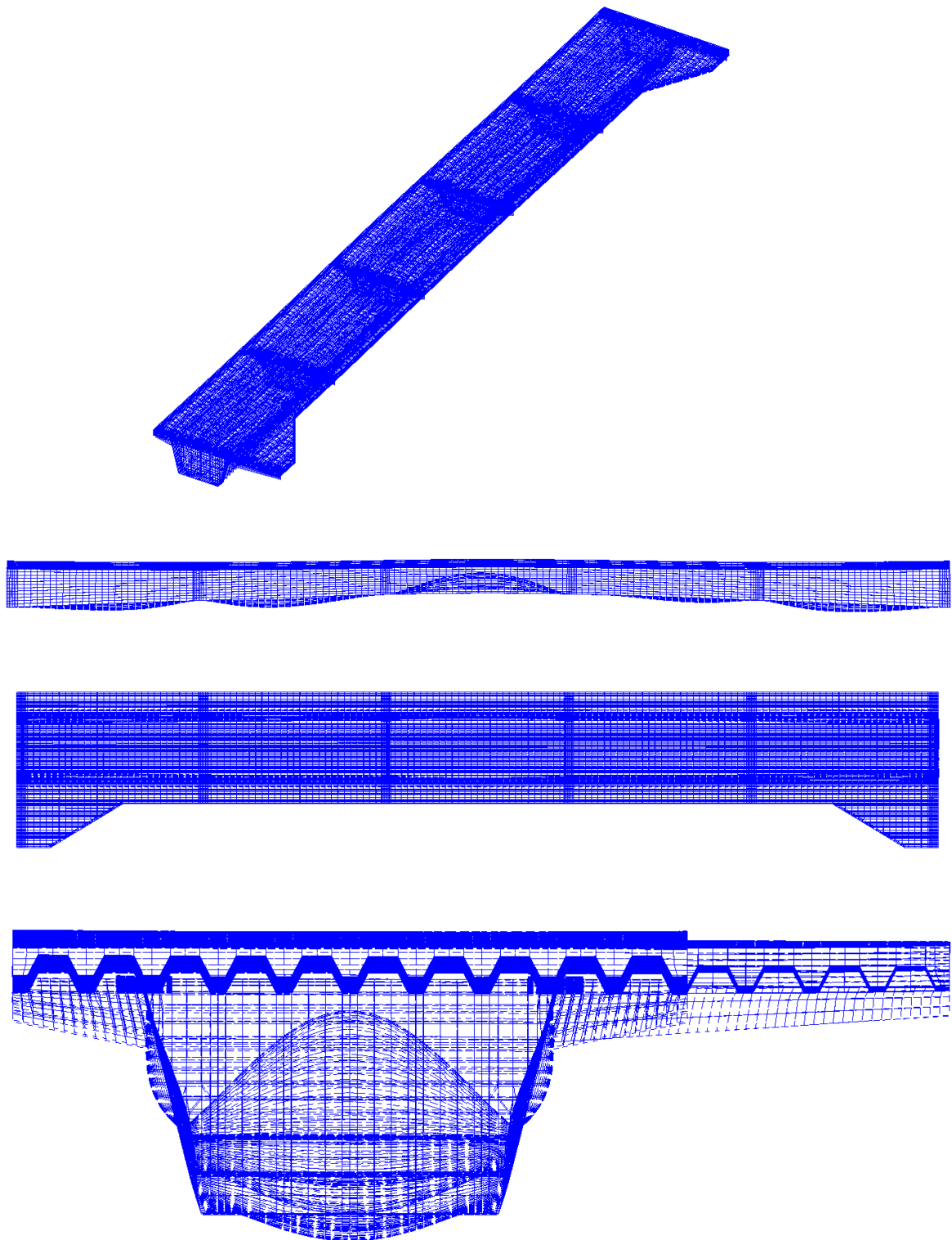


Fig. 149. Modo S-4 34.598 Hz). Tramo B.

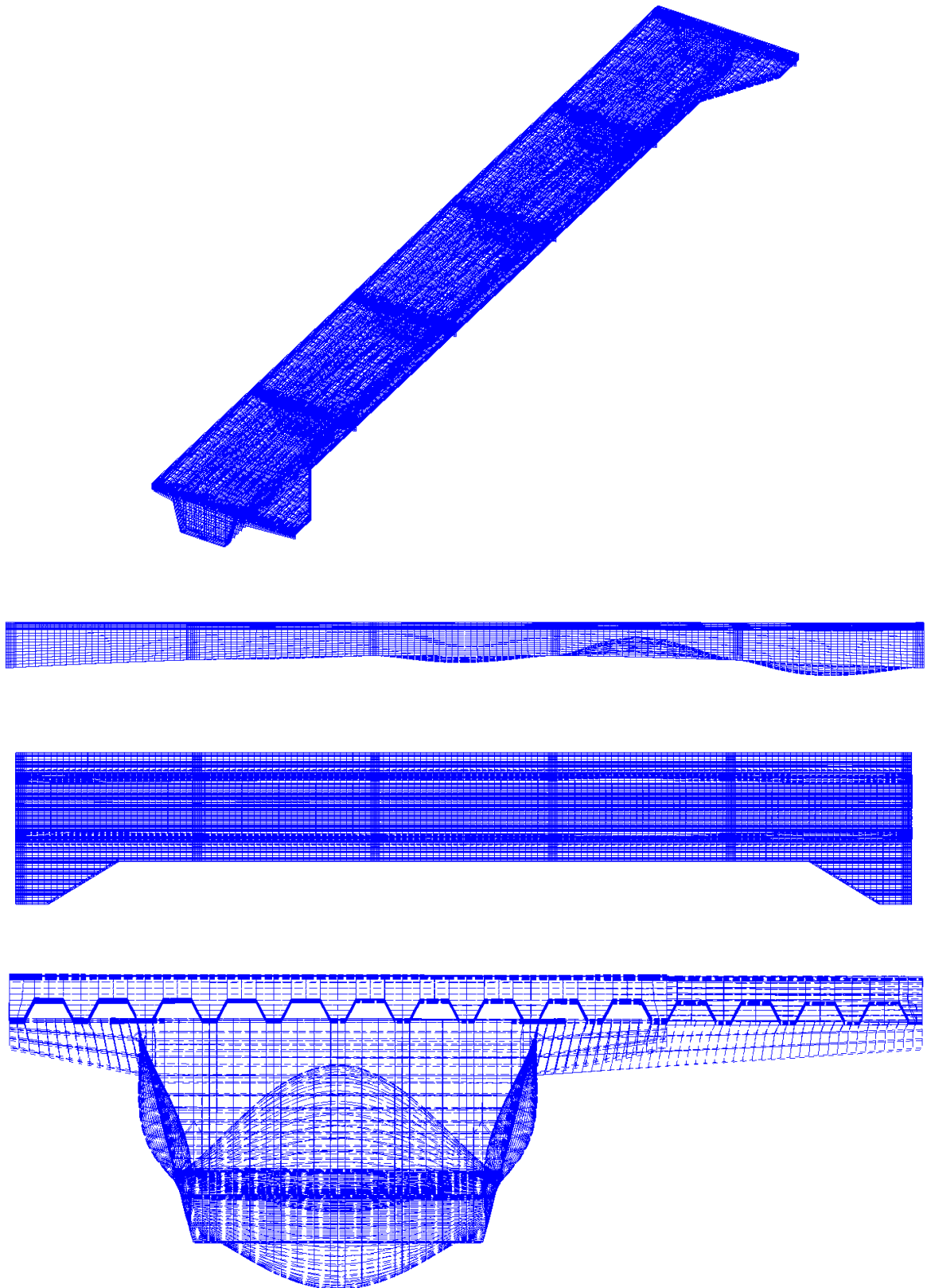


Fig. 150. Modo S-5 (37.376 Hz). Tramo B.

Como se desprende de los resultados anteriores, en ambos módulos se obtienen frecuencias de vibración superiores al límite de 4.6 Hz establecido por la normativa en vigor como umbral de seguridad.

En el tramo A, el primer modo de vibración corresponde a un modo de flexo-torsión, con una frecuencia natural de 10.486 Hz. En el tramo B, el primer modo de vibración corresponde al primer modo de flexión como viga simple, con una frecuencia natural de 5.407 Hz.

Dado que en ambos tramos las primeras frecuencias se sitúan por encima del límite admisible, no se precisan cálculos dinámicos adicionales.

4.5. Reacciones sobre los apoyos

A continuación se incluyen los valores de las reacciones en cada hipótesis, necesarias para el diseño de los estribos.

Tabla XXVII. Reacciones Tramo A. Valores de servicio (kN)

Hipótesis	Reacción	Apoyo 1	Apoyo 2	TOTAL
I	V	29.86	31.59	61.45
II	V	67.58	72.17	139.75

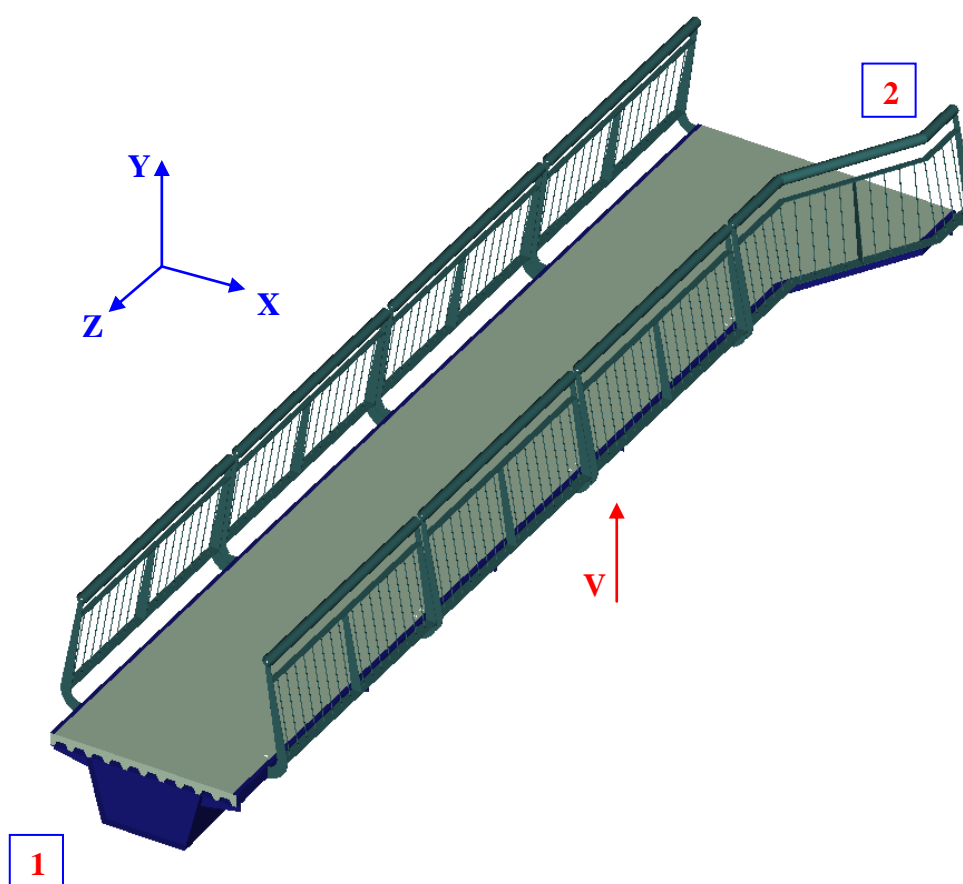
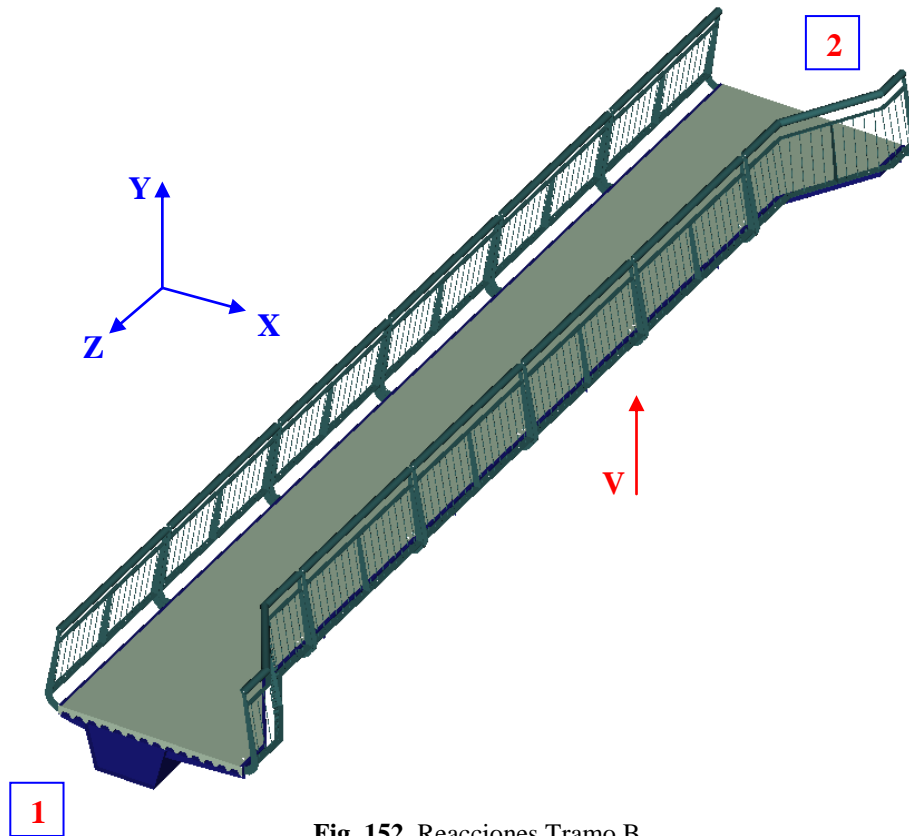


Fig. 151. Reacciones Tramo A.

Tabla XXVIII. Reacciones Tramo B. Valores de servicio (kN)

Hipótesis	Reacción	Apoyo 1	Apoyo 2	TOTAL
I	V	44.14	44.17	88.31
II	V	101.2	101.3	202.5

**Fig. 152.** Reacciones Tramo B.

INDICE DE FIGURAS

FIG.	TITULO	PÁG.	REF.
1	Situación de Santa Marina del Rey en la provincia de León.	2	[1]
2	Mapa del municipio de Santa Marina del Rey.	2	[2]
3	Mapa de carreteras.	3	[3]
4	Imagen del puente sobre el río Órbigo a su paso por Santa Marina del Rey.	4	[4] [5]
5	Planos de referencia. Alzado y planta del puente y pasarela peatonal.	6	Anexo
6	Planos de referencia. Detalle del alzado.	6	Anexo
7	Detalle secciones planos originales. Tramo A y B.	7	Anexo
8	Detalle secciones. Tramo A y B.	8	Anexo
9	Planos de referencia. Detalle de la planta.	8	Anexo
10	Planos de referencia. Detalle de la chapa colaborante. Espesor 0.8 mm	9	[6]
11	Planos de referencia. Detalle del apoyo entre pasarela y puente en las ménsulas intermedias.	9	Anexo
12	Planos de referencia. Detalle del apoyo entre pasarela y puente en las ménsulas extremas.	10	Anexo
13	Puente original, vistas generales	11	
14	Detalle del puente	11	
15	Configuración del puente con la pasarela peatonal	12	
16	Detalle del puente con la pasarela peatonal	12	
17	Detalle pasarela peatonal con apoyos puente hormigón	13	
18	Detalle ménsula intermedia entre pasarela peatonal y puente hormigón	13	
19	Detalle Tramo A con apoyos	14	
20	Detalle Tramo B con apoyos	14	
21	Configuración del tramo A.	15	
22	Configuración del tramo B.	15	
23	Detalle del apoyo entre pasarela y puente en las ménsulas intermedias.	16	
24	Detalle del apoyo entre pasarela y puente en las ménsulas extremas.	16	
25	Detalle viga cajón. Tramo A	17	
26	Detalle viga cajón. Tramo B	17	
27	Variables de diseño	20	
28	Desplazamiento máximo vertical [mm] con carga permanente. Tramo A	22	
29	Relación (L/δ_v) con carga permanente. Tramo A	22	
30	Desplazamiento máximo vertical [mm] con sobrecarga. Tramo A	23	
31	Relación (L/δ_v) con sobrecarga. Tramo A	23	
32	Desplazamiento máximo activo vertical [mm] sólo con sobrecarga. Tramo A	24	

33	Relación (L/δ_v) sólo con sobrecarga. Tramo A	24	
34	Desplazamiento máximo vertical [mm] con carga permanente. Tramo B	26	
35	Relación (L/δ_v) con carga permanente. Tramo B	26	
36	Desplazamiento máximo vertical [mm] con sobrecarga. Tramo B	27	
37	Relación (L/δ_v) con sobrecarga. Tramo B	27	
38	Desplazamiento máximo activo vertical [mm] sólo con sobrecarga. Tramo B	28	
39	Relación (L/δ_v) sólo con sobrecarga. Tramo B	28	
40	Tensión máxima chapa lateral [MPa]. Tramo A	30	
41	Tensión máxima chapa base [MPa]. Tramo A	30	
42	Tensión máxima [MPa] diafragmas $e=10\text{mm}$. Tramo A	31	
43	Tensión máxima [MPa] diafragmas $e=15\text{mm}$. Tramo A	31	
44	Tensión máxima [MPa] diafragmas $e=18\text{mm}$. Tramo A	32	
45	Tensión máxima chapa lateral [MPa]. Tramo B	33	
46	Tensión máxima chapa base [MPa]. Tramo B	33	
47	Tensión máxima [MPa] diafragmas $e=15\text{mm}$. Tramo B	34	
48	Tensión máxima [MPa] diafragmas $e=20\text{mm}$. Tramo B	34	
49	Tensión máxima [MPa] diafragmas $e=22\text{mm}$. Tramo B	35	
50	Carga crítica de abolladura. Tramo A	36	
51	Carga crítica de abolladura. Tramo B	37	
52	Frecuencia natural de vibración [Hz]. Tramo A	38	
53	Frecuencia natural de vibración [Hz]. Tramo B	39	
54	Función objetivo. Peso viga cajón [Kg]. Tramo A	40	
55	Función objetivo. Peso viga cajón [Kg]. Tramo B	41	
56	Modelo de elementos finitos. Vista en sólido. Tramo A	43	
57	Modelo de elementos finitos. Alzado. Tramo A	43	
58	Modelo de elementos finitos. Planta. Tramo A	43	
59	Modelo de elementos finitos. Vista longitudinal. Tramo A	43	
60	Modelo de elementos finitos. Viga cajón y diafragmas. Tramo A	44	
61	Modelo de elementos finitos. Viga cajón, diafragmas y vuelos. Tramo A	44	
62	Modelo de elementos finitos. Forjado colaborante, correas de cierre y hormigón. Tramo A	45	
63	Modelo de elementos finitos. Vista en sólido. Tramo B	46	
64	Modelo de elementos finitos. Alzado. Tramo B	46	
65	Modelo de elementos finitos. Planta. Tramo B	46	
66	Modelo de elementos finitos. Vista longitudinal. Tramo B	46	
67	Modelo de elementos finitos. Viga cajón y diafragmas. Tramo B	47	
68	Modelo de elementos finitos. Viga cajón, diafragmas y vuelos. Tramo B	47	
69	Modelo de elementos finitos. Forjado colaborante, correas de cierre y	48	

	hormigón. Tramo B		
70	Modelo de elementos finitos. Vista inferior. Zona de unión travesaño-forjado colaborante	48	
71	Modelo de elementos finitos. Vista inferior. Zona de arranque forjado colaborante	49	
72	Modelo de elementos finitos. Vista inferior. Viga cajón-forjado colaborante	49	
73	Modelo de elementos finitos. Chapa base de 8 mm. Tramo A	50	
74	Modelo de elementos finitos. Chapa lateral de 6 mm. Tramo A	50	
75	Modelo de elementos finitos. Chapa de 10 mm. Tramo A	51	
76	Modelo de elementos finitos. Chapa de 2 mm. Tramo A	51	
77	Modelo de elementos finitos. Diafragma de 10 mm. Tramo A	52	
78	Modelo de elementos finitos. Diafragma de 15 mm. Tramo A	52	
79	Modelo de elementos finitos. Diafragma de 18 mm. Tramo A	52	
80	Modelo de elementos finitos. Chapa colaborante. Tramo A	53	
81	Modelo de elementos finitos. Hormigón. Tramo A	53	
82	Modelo de elementos finitos. Chapa base de 8 mm. Tramo B	54	
83	Modelo de elementos finitos. Chapa lateral de 6 mm. Tramo B	54	
84	Modelo de elementos finitos. Chapa de 10 mm. Tramo B	55	
85	Modelo de elementos finitos. Chapa de 2 mm. Tramo B	55	
86	Modelo de elementos finitos. Diafragma de 15 mm. Tramo B	56	
87	Modelo de elementos finitos. Diafragma de 20 mm. Tramo B	56	
88	Modelo de elementos finitos. Diafragma de 22 mm. Tramo B	56	
89	Modelo de elementos finitos. Chapa colaborante. Tramo B	57	
90	Modelo de elementos finitos. Hormigón. Tramo B	57	
91	Modelo de elementos finitos. Detalle de la chapa colaborante	58	
92	Condiciones de apoyo. Tramo A	59	
93	Condiciones de apoyo en la base. Tramo A	60	
94	Desplazamientos libres en dirección longitudinal. Tramo A	60	
95	Condiciones de apoyo. Tramo B	61	
96	Condiciones de apoyo en la base. Tramo B	61	
97	Desplazamientos libres en dirección longitudinal. Tramo B	62	
98	Sobrecarga total. Tramo A	63	
99	Sobrecarga total. Tramo B	63	
100	Deformada. Perspectiva. Tramo A	66	
101	Deformada. Alzado. Tramo A	66	
102	Deformada. Planta. Tramo A	66	
103	Deformada. Perfil. Tramo A	66	
104	Deformada. Perspectiva. Tramo B	67	

105	Deformada. Alzado. Tramo B	67	
106	Deformada. Planta. Tramo B	67	
107	Deformada. Perfil. Tramo B	67	
108	Deformada. Perspectiva. Tramo A	68	
109	Deformada. Alzado. Tramo A	68	
110	Deformada. Planta. Tramo A	68	
111	Deformada. Perfil. Tramo A	68	
112	Deformada. Perspectiva. Tramo B	69	
113	Deformada. Alzado. Tramo B	69	
114	Deformada. Planta. Tramo B	69	
115	Deformada. Perfil. Tramo B	69	
116	Tensiones en la chapa base. ELU-I. Tramo A	72	
117	Tensiones en la chapa base. ELU-II. Tramo A	72	
118	Tensiones en las chapas laterales. ELU-I. Tramo A	73	
119	Tensiones en las chapas laterales. ELU-II. Tramo A	73	
120	Tensiones en los diafragmas. ELU-I. Tramo A	74	
121	Tensiones en los diafragmas. ELU-II. Tramo A	74	
122	Tensiones en la chapa base. ELU-I. Tramo B	75	
123	Tensiones en la chapa base. ELU-II. Tramo B	75	
124	Tensiones en las chapas laterales. ELU-I. Tramo B	76	
125	Tensiones en las chapas laterales. ELU-II. Tramo B	76	
126	Tensiones en los diafragmas. ELU-I. Tramo B	77	
127	Tensiones en los diafragmas. ELU-II. Tramo B	77	
128	Detalle conectadores en chapa colaborante y viga cajón	78	
129	Deformada e indeformada. Tramo A (x100)	79	
130	Deformada e indeformada. Tramo B (x50)	79	
131	Modo 1. Pandeo global ($\lambda_{crf}=15.832$). Tramo A	82	
132	Modo 2. Abolladura ($\lambda_{crf}=17.117$). Tramo A	83	
133	Modo 3. Abolladura ($\lambda_{crf}=17.511$). Tramo A	84	
134	Modo 4. Abolladura ($\lambda_{crf}=17.934$). Tramo A	85	
135	Modo 5. Abolladura ($\lambda_{crf}=18.491$). Tramo A	86	
136	Modo 1. Pandeo global ($\lambda_{crf}=11.035$). Tramo B	87	
137	Modo 2. Abolladura ($\lambda_{crf}=11.232$). Tramo B	88	
138	Modo 3. Abolladura ($\lambda_{crf}=11.777$). Tramo B	89	
139	Modo 4. Abolladura ($\lambda_{crf}=11.787$). Tramo B	90	
140	Modo 5. Abolladura ($\lambda_{crf}=11.883$). Tramo B	91	
141	Modo S-1 (10.486 Hz). Tramo A.	93	
142	Modo S-2 (12.059 Hz). Tramo A.	94	

143	Modo S-3 (33.546 Hz). Tramo A.	95	
144	Modo S-4 (39.637 Hz). Tramo A.	96	
145	Modo S-5 (41.321 Hz). Tramo A.	97	
146	Modo S-1 (5.407 Hz). Tramo B.	98	
147	Modo S-2 (14.255 Hz). Tramo B.	99	
148	Modo S-3 (20.117 Hz). Tramo B.	100	
149	Modo S-4 (34.598 Hz). Tramo B.	101	
150	Modo S-5 (37.376 Hz). Tramo B.	102	
151	Reacciones Tramo A.	104	
152	Reacciones Tramo B.	105	

INDICE DE TABLAS

TABLA	TITULO	PÁG.
I	Espesores de cálculo (mm)	20
II	Desplazamiento máx. vertical y relación (L/δ_v) con carga permanente [mm]. Hipótesis ELS-I. Tramo A	22
III	Desplazamiento máx. vertical y relación (L/δ_v) con sobrecarga [mm]. Hipótesis ELS-II. Tramo A	23
IV	Desplazamiento máx. activo vertical y relación (L/δ_v) sólo con sobrecarga [mm]. Tramo A	24
V	Desplazamiento máx. vertical y relación (L/δ_v) con carga permanente [mm]. Hipótesis ELS-I. Tramo B	26
VI	Desplazamiento máx. vertical y relación (L/δ_v) con sobrecarga [mm]. Hipótesis ELS-II. Tramo B	27
VII	Desplazamiento máx. activo vertical y relación (L/δ_v) sólo con sobrecarga [mm]. Tramo B	28
VIII	Tensión máxima chapa lateral y chapa base [MPa]. Tramo A	30
IX	Tensión máxima [MPa] diafragma $e=10\text{mm}$. Tramo A	32
X	Tensión máxima [MPa] diafragma $e=15\text{mm}$. Tramo A	32
XI	Tensión máxima [MPa] diafragma $e=18\text{mm}$. Tramo A	32
XII	Tensión máxima chapa lateral y chapa base [MPa]. Tramo B	33
XIII	Tensión máxima [MPa] diafragma $e=15\text{mm}$. Tramo B	34
XIV	Tensión máxima [MPa] diafragma $e=20\text{mm}$. Tramo B	34
XV	Tensión máxima [MPa] diafragma $e=22\text{mm}$. Tramo B	35
XVI	Carga crítica de abolladura. Tramo A	36
XVII	Carga crítica de abolladura. Tramo B	36
XVIII	Frecuencia natural de vibración [Hz]. Tramo A	38
XIX	Frecuencia natural de vibración [Hz]. Tramo B	38
XX	Hipótesis de carga	64
XXI	Desplazamientos verticales máximos (mm). Tramo A	70
XXII	Desplazamiento vertical máximo activo (mm). Tramo A	70
XXIII	Desplazamientos verticales máximos (mm). Tramo B	70
XXIV	Desplazamiento vertical máximo activo (mm). Tramo B	70
XXV	Tensiones máximas de von Mises (MPa)	71
XXVI	Esfuerzos máximos en forjado colaborante (kN/m, m.kN/m)	78
XXVII	Reacciones Tramo A. Valores de servicio (kN)	104
XXVIII	Reacciones Tramo B. Valores de servicio (kN)	105

BIBLIOGRAFIA

- [1].<http://www.aytosantamarinadelrey.es/index.php/mod.imagenes/mem.popup/idimagen.21/description.Situaci%F3n%20en%20la%20Provincia/alt.Situaci%F3n%20en%20la%20Provincia/longdesc./title./chk.de6bcd7628f540a7284023b8a3903252.html>
- [2].<http://www.aytosantamarinadelrey.es/index.php/mod.imagenes/mem.popup/idimagen.22/description.Mapa%20del%20Municipio/alt.Mapa%20del%20Municipio/longdesc./title./chk.0edb f8a75ede75d82853f9985b72fdb7.html>
- [3].<http://www.pueblos20.net/Castilla-Leon/mapa-carreteras.php?id=17727&ayuntamiento=5875&provincia=30&comunidad=7>
- [4]. <http://www.pueblos-espana.org/castilla+y+leon/leon/santa+marina+del+rey/530804/>
- [5].<http://www.pueblos-espana.org/castilla+y+leon/leon/santa+marina+del+rey/Puente+del+Orbigo/>
- [6]. Catálogo CM Curbimetal. Perfil CM 55-880
- [7]. I-DEAS, web site, <http://www.ugs.com/>, 2007.

LISTA DE PLANOS

PLANOS INICIALES

Nº	TÍTULO
2	Planta, alzado y sección tipo
3	Planta y alzado: detalle
4	Diafragmas
5	Ménsulas intermedias
6	Ménsulas extremas
7	Detalles
8	Alumbrado público

PLANOS FINALES

Nº	TÍTULO
001	Puente original. Vistas generales
002	Puente original. Refrentado de machones
003	Puente original. Apoyos pasarela
004	Puente original. Disposición de la pasarela
005	Puente y pasarela. Dimensiones globales
006	Pasarela peatonal. Apoyo intermedio
007	Pasarela peatonal. Apoyo extremo
008	Pasarela peatonal. Tramo extremo (A)
009	Pasarela peatonal. Tramo intermedio (A)
010	Tramo A. Secciones
011	Tramo B. Secciones
012	Forjado colaborante. Sección tipo 1.80m
013	Forjado colaborante. Sección tipo 2.50m
014	Tramo A. Montaje viga cajón
015	Tramo A. Plano de conjunto
016	Tramo A. Chapas viga cajón
017	Tramo A. Correa C 120x40x2
018	Tramo A. Secciones
019	Tramo A. Diafragmas
020	Tramo A. Apoyo base
021	Tramo A. Cartela extremo largo
022	Tramo A. Cartela extremo corto
023	Tramo B. Montaje viga cajón
024	Tramo B. Plano de conjunto

025	Tramo B. Chapas viga cajón
026	Tramo B. Correa C 120x40x2
027	Tramo B. Secciones
028	Tramo B. Diafragmas
029	Tramo B. Apoyo base
030	Tramo B. Cartela extremo largo
031	Tramo B. Cartela extremo corto
032	Tramo A. Secuencia de montaje
033	Tramo B. Secuencia de montaje
034	Pasarela peatonal. Barandilla Tramo A
035	Pasarela peatonal. Barandilla Tramo B

